MATERIALES
Los hermanos del grafeno

SALUD PÚBLICA
La lucha contra los mosquitos

EVOLUCIÓN
La auténtica paleodieta

INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

Septiembre 2018 InvestigacionyCiencia.es

Edición española de Scientific American

CRUZAR LA FRONTERA CUÁNTICA

¿Dónde está el límite entre el mundo cuántico y el clásico?

INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

EL LÍMITE CUÁNTICO | LA AUTÉNTICA PALEODIETA | MATERIALES BIDIMENSIONALES

SEPTIEMBRE 2018 N.º 504



6,90 EUROS

INVESTIGACIÓN Y CIENCIA
Septiembre 2018, Número 504

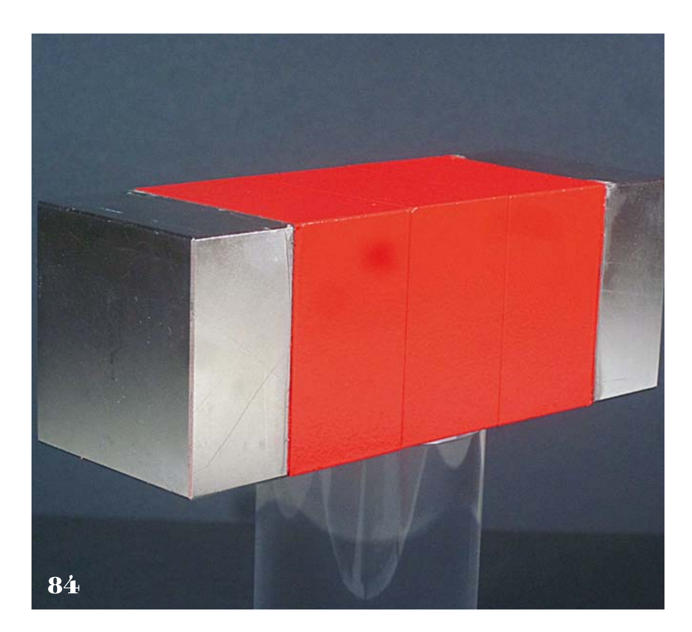


DIANE COOK Y LEN JENSHEL ARCHIVO DE *NATIONAL GEOGRAPHIC*

ARTÍCULOS


6


52


84

INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

SECCIONES



EN PORTADA



La teoría cuántica contempla un mundo microscópico lleno de probabilidades y estados inciertos que nunca experimentamos en nuestra realidad cotidiana. Si no hay una frontera entre ambos dominios, ¿por qué cambian las reglas del juego? Si la hay, ¿dónde está? Para responder a esta pregunta, varios experimentos están intentando inducir estados cuánticos en objetos de tamaño macroscópico.

redaccion@investigacionyciencia.es



Abril y mayo de 2018

AGUJEROS NEGROS PRIMITIVOS

Con respecto al artículo «Los primeros agujeros negros supermasivos», de Priyamvada Natarajan [Investigación y Ciencia, abril de 2018]: si en el universo primitivo ya había un número sustancial de estos objetos, los cuáles aún pueden verse hoy desde grandes distancias, ¿qué fue de ellos? ¿No deberíamos verlos, así como los cuásares que producen, a distancias más próximas en el universo moderno?

Jean Renard Ward

Se han hallado agujeros negros supermasivos en el centro de las galaxias espirales. Dado que algunos de estos objetos son mucho mayores de lo que se pensaba hasta ahora, ¿sigue siendo necesaria la materia oscura para explicar la cohesión de las galaxias?

Bruce Emerick
Carriere, Misisipi

Responde Natarajan: *En respuesta a la pregunta de Ward, sí vemos monstruosos agujeros negros a nuestro alrededor, en el universo cercano. Casi todas las galaxias próximas albergan en su centro uno de estos objetos, siendo las más brillantes las que hospedan a los más masivos. Pero estos monstruos cercanos ya no se están alimentando de gas, por lo que no brillan en forma de cuásares. En su lugar, los detectamos por el efecto que ejercen en el movimiento de las estrellas vecinas, las cuales aceleran. Al medir sus velocidades, podemos inferir el tirón gravitatorio del agujero negro y estimar su masa.*

En cuanto a la pregunta de Emerick, a pesar de que los agujeros negros que ocupan el centro de las galaxias son supermasivos, su región de influencia es limitada: las estrellas de las regiones interiores los superan en masa, por lo que son estas las que dominan gravitacionalmente. Por desgracia, estos monstruos resultan insuficientes para mantener cohesionada a la galaxia, ya que su gravedad domina solo en una pequeña región. Y, para explicar las velocidades de rotación de las estrellas en las regiones exteriores, sigue siendo necesario postular la existencia de grandes cantidades de materia oscura.

ANÁLISIS DE CONFLICTOS

En «El tribalismo de la verdad» [Investigación y Ciencia, mayo de 2018], Matthew Fisher, Joshua Knobe, Brent Strickland y Frank C. Keil argumentan que, en las respuestas a preguntas morales o políticas, el mundo está dividido en visiones objetivistas y relativistas, y que una perspectiva objetivista está ligada a argumentar para ganar, mientras que una relativista está ligada a argumentar para aprender. Creo que es posible una tercera perspectiva: la del aprendiz objetivista. De hecho, el método científico se basa en suponer que existe una verdad o razón objetiva tras los fenómenos observables, la cual es posible dilucidar por medio de experimentos bien diseñados.

Un diálogo abierto y franco sobre cuestiones para las cuales no hay una verdad objetiva, como si el queso crema vegetariano es sabroso o no, constituye otra forma de aprendizaje: aprendizaje de opinión. Las dificultades aparecen cuando una verdad objetiva se trata como una opinión, o viceversa. Hacerlo obstaculiza el aprendizaje.

Paul M. Kioko

ELEMENTOS SUPERPESADOS

En «La isla de los pesos pesados» [Investigación y Ciencia, mayo de 2018], Christoph E. Düllmann y Michael Block explican los intentos para generar elementos químicos superpesados capaces de pervivir varios minutos o más antes de desintegrarse, lo que daría lugar a una «isla de estabilidad» en la tabla periódica.

Cabría pensar que los isótopos superpesados cercanos a la isla de estabilidad se generarían en las colisiones de estrellas de neutrones, las cuales destacan por la creación de isótopos pesados y ricos en neutrones. ¿Sería posible detectar elementos superpesados en los restos de colisiones de estrellas de neutrones, como el observado el año pasado? En los restos de esa colisión, ¿se detectó o se infirió la presencia de uranio?

David Lambert
San José, California

Responde Düllmann: *La cuestión de si los elementos superpesados podrían formarse en procesos naturales es una de las más interesantes del campo, y aún carece de respuesta concluyente. Una pregunta abierta es cómo se desintegran los núcleos más pesados que se generan en los fenómenos astrofísicos. Si lo hacen por fisión espontánea (es decir, descomponiéndose en dos fragmentos más ligeros), no habría acceso a la isla de estabilidad. Por el contrario, si fuesen lo suficientemente estables para que el modo dominante de desintegración fuese otro, como la desintegración beta, sí podría haber una ruta que llevase a dicha isla. Por tanto, estudiar la estructura nuclear y la estabilidad de los elementos más pesados constituye una parte importante de la investigación. De especial interés son los núcleos más ricos en neutrones, ya que los eventos astrofísicos relevantes tienen lugar en entornos ricos en neutrones.*

En cuanto a la colisión de estrellas de neutrones observada hace poco, en ella no se identificaron elementos individuales. La firma óptica detectada puede explicarse mediante la formación de elementos muy pesados, pero no se midió ninguna señal específicamente ligada al uranio.

CARTAS DE LOS LECTORES

Investigación y Ciencia agradece la opinión de los lectores. Le animamos a enviar sus comentarios a:

PRENSA CIENTÍFICA, S. A.
Muntaner 339, pral. 1.ª, 08021 BARCELONA
o a la dirección de correo electrónico:
redaccion@investigacionyciencia.es

La longitud de las cartas no deberá exceder los 2000 caracteres, espacios incluidos. Investigación y Ciencia se reserva el derecho a resumirlas por cuestiones de espacio o claridad. No se garantiza la respuesta a todas las cartas publicadas.



LOS PALEONTÓLOGOS creen que los cánidos borofaginos como *Borophagus secundus* (*en la imagen*) poseyeron mandíbulas lo bastante robustas como para triturar la osamenta de sus presas.

PALEONTOLOGÍA

Rompehuesos canino

Excrementos fosilizados revelan la temible dentellada de un cánido prehistórico

DE «FIRST BONE-CRACKING DOG COPROLITES PROVIDE NEW INSIGHT INTO BONE CONSUMPTION IN *BOROPHAGUS* AND THEIR UNIQUE ECOLOGICAL NICHE», POR XIAOMING WANG ET AL., EN *ELIFE*, N.º 7:E34773 DOI, MAYO DE 2018

Un grupo de cánidos corpulentos era capaz de hacer astillas los huesos de sus presas, según se deduce de una pila de excrementos fósiles de seis millones de años de antigüedad. Los borofaginos (Borophaginae, «devoradores voraces») ocuparon en Norteamérica un raro nicho de osteófagos que nadie ha vuelto a ocupar desde entonces.

La mayoría de los carnívoros actuales, entre ellos los cánidos, están armados de dientes largos y afilados que no resistirían la presión requerida para aplastar los grandes huesos largos. En cambio, los borofaginos estaban provistos de una dentadura más recia y achatada, así como de un hocico más corto que maximizaba la fuerza de sus mandíbulas. «No hay paralelos entre los cánidos actuales y estos osteófagos», asegura Xiaoming Wang, paleontólogo del Museo de Historia Natural del Condado de Los Ángeles y uno de los autores del estudio que da a conocer el hallazgo. «El único ejemplo viviente similar sería la hiena manchada de África.»

Los entendidos repararon por vez primera en el parecido de estos cánidos extintos con las hienas a finales del siglo XIX. Edward Drinker Cope, pionero de la paleontología, describió la especie en 1893: «La dentadura resulta idónea para triturar los huesos, mientras que los caninos sirven al consabido fin de desgarrar la carne». Aun así, se trataba de una conjetura basada únicamente en la anatomía. El apodo de «rompehuesos» cuajó, pero hasta ahora no existían pruebas directas de que estos carnívoros fueran capaces de hacer añicos el fémur y las costillas.

El coleccionista de fósiles y edafólogo jubilado Dennis Garber relata cómo halló casualmente el excremento fósil. En 1995, mientras navegaba por el lago Turlock,

en el californiano Valle de San Joaquín, divisó un objeto gris azulado en la orilla. Garber, que había estado recolectando fósiles en la zona desde 1956, no tardó en reconocer un excremento petrificado, o coprolito. Como mostraba fragmentos de hueso en la superficie, lo más probable es que pertenecieran a un gran carnívoro y los borofaginos eran la única fauna de ese tipo conocida entonces por allí, explica. «Comencé a escarbar en las inmediaciones y desenterré bastantes más.»

Los responsables del estudio creen que Garber debió de dar con una «letrina» comunitaria, lo cual indicaría que los borofaginos vivían en grupos que defecaban en la misma zona, como muchos carnívoros gregarios actuales. El descubrimiento, publicado en mayo en *eLife*, «no solo aporta pistas sobre la fisiología de estos carnívoros primitivos, sino de su organización social», opina la paleontóloga Julie Meachen de la Universidad de Des Moines, ajena al estudio.

Para examinar el interior de los coprolitos, los autores acudieron a investigadores de la Facultad de Odontología de la Universidad de California en Los Ángeles, con el fin de obtener imágenes de TAC. Estas sacaron a la luz fragmentos óseos en todas las heces. Entre ellos un gran pedazo de costilla de un herbívoro de la talla de un ciervo, que según los cálculos podría haber llegado a cuadruplicar el peso de cualquiera de sus cazadores caninos. Ello refuerza la idea de que los borofaginos cazaban en jauría, si bien no descarta por completo el carroñeo, matiza Wang. «Lo que me sorprendió fue la abundancia de huesos», añade. Esa circunstancia, sumada a la anatomía mandibular del cánido en cuestión, hacen pensar que los fragmentos óseos voluminosos formaban parte de su régimen alimentario.

Wang plantea que además de cazar en grupo, ser corredores infatigables y compartir el retrete, los borofaginos debieron ser devoradores ávidos, que competían entre sí. Una manada de hienas es capaz de no dejar ni rastro de un ñu en cuestión de minutos y la primera en llegar se lleva la mejor parte. Cuando saciar el hambre se convierte en una carrera contra los demás, ser capaz de romper el fémur y arrancar un gran pedazo de la pierna supone una ventaja indudable. Los borofaginos pudieron lucir esos mismos modales en la mesa. Meachen concuerda con esa idea. «Todos esos carnívoros habrían estado sujetos a



LOS COPROLITOS, o fósiles de las heces, ofrecen pruebas directas sobre los cánidos osteófagos.

EVOLUCIÓN

Máscaras mortuorias

Cómo consiguieron fosilizar los animales más antiguos

Imagínese una máscara confeccionada en el momento de la muerte que conservara su efigie por espacio de millones de años. De alguna manera, eso es lo que le sucedió a algunos de los animales más antiguos del planeta. Revestidos por «máscaras mortuorias» compuestas por mineral de pirita (el «oro de los necios»), estas criaturas de cuerpo blando eludieron la putrefacción durante el tiempo suficiente para acabar formando parte del registro fósil, explican los paleontólogos.

Vivieron hace entre 575 y 541 millones de años, durante el período Ediacarense, y su morfología evoca seres venidos de otros mundos: uno, *Kimberella*, recuerda a un aguacate envuelto por una puntilla; otro, *Dickinsonia*, podría pasar por ser el cruce de una tortita con una lombriz. El lugar que ocupa este grupo en el árbol evolutivo es un misterio (no todos eran animales, aunque algunos sí), y entre sus miembros figuran con toda probabilidad ancestros o parientes cercanos de todas las especies zoológicas posteriores. Otro enigma que persiste es cómo pudo fosilizar la fauna ediacarense si supuestamente carecía de partes duras. Los animales menudos de cuerpo blando suelen ser devorados o se descomponen con rapidez, por lo que raramente fosilizan tras su muerte.

Para investigar todas estas cuestiones, un equipo encabezado por el paleontólogo Brandt Gibson, de la Universidad Vanderbilt, sacrificó anémonas de mar y moluscos, animales actuales cuya anatomía se acerca más a la de la fauna ediacarense. Depositaron los cuerpos en tanques de agua salada para recrear la composición química de los mares primitivos y observaron cómo la pirita rica en hierro se depositaba sobre sus restos a lo lar-



ESPÉCIMEN FÓSIL de *Dickinsonia costata*.

MUSEO DE HISTORIA NATURAL DEL CONDADO DE LOS ÁNGELES (*coprolitos*); GETTY IMAGES (*fósil*)

la misma norma: "O engulles sin masticar, o sin probar bocado te quedarás".»

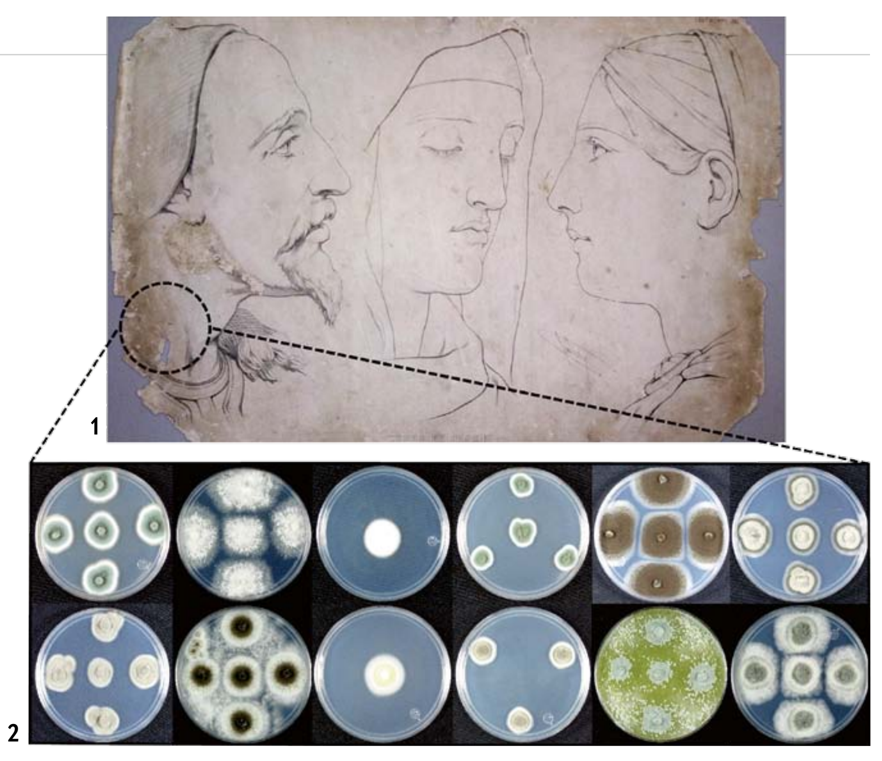
Este grupo de cánidos prehistóricos también pudo acelerar el reciclaje de ciertos nutrientes. Las hienas actuales descomponen los huesos con más rapidez que los microbios y esparcen por la sabana nutrientes como el calcio con sus deposiciones blancuzcas y yesosas. En cambio, Wang afirma que la digestión de los borofaginos no parecía ser tan radical. «A diferencia de las hienas, los cánidos osteófagos carecían de los jugos gástricos sumamente ácidos necesarios para disolver los huesos», explica. Pero triturar y dispersar los fragmentos óseos por las praderas debió tener un efecto similar de diseminación, señala.

El linaje de los borofaginos desapareció misteriosamente hace unos dos millones de años sin dejar descendencia. Pero constituyeron un grupo notorio de carnívoros, pues docenas de especies se sucedieron a lo largo de 30 millones de años de la historia fósil de Norteamérica. «Hoy en día no existe ningún grupo zoológico parecido, y, sin embargo, habitaron en ese continente donde posiblemente desempeñaron una función ecológica realmente notable, sobre todo a la hora de eliminar los cadáveres y facilitar el reciclaje de los nutrientes», afirma la paleoecóloga Larisa DeSantis, de la Universidad Vanderbilt, que no ha participado en el estudio. «Así que reconstruir su ecología tendrá sin duda algo de labor detectivesca.» *—Diana Crow*

go de un mes aproximadamente. Publicado el pasado mayo en *PALAIOS*, el estudio ha sido el primero en observar la formación de esas máscaras mortuorias en el laboratorio.

Las mortajas no impidieron del todo la putrefacción. Por ejemplo, los tentáculos de las anémonas «se descompusieron en poco tiempo», apunta Gibson. Este hecho indica que los fósiles ediacarenses podrían no ser el retrato completo del aspecto en vida. Colmar esa laguna de información podría ser fundamental para ubicar a tan extrañas criaturas en el árbol de la vida.

Alex Liu, paleobiólogo de la Universidad de Cambridge, que no ha participado en la investigación, afirma que el trabajo «viene a reforzar la idea en auge de que el Edicarense no es el período "enigmático" que se venía pintando desde hace décadas, y que las incógnitas que encierra no son inescrutables». *—Lucas Joel*



MUESTRAS DE HONGOS (2) hallados en una litografía de Bernard Romain Julien (*1*).

DE «TWO NEW CELLULOLYTIC FUNGAL SPECIES ISOLATED FROM A 19TH-CENTURY ART COLLECTION», POR CAROLINA CORONADO-RUIZ ET AL., EN *SCIENTIFIC REPORTS*, VOL. 8, ARTÍCULO N.º 7492, MAYO DE 2018.

MICROBIOLOGÍA

Hongos iconoclastas

Dos nuevas especies descubiertas destruyen litografías antiguas

Científicos costarricenses han descubierto nuevas especies de hongos que colonizan un extraño lugar: una colección de litografías del artista francés del siglo XIX Bernard Romain Julien. Los hongos están acelerando el deterioro de las impresiones, que constituyen algunas de las obras más antiguas que atesora la colección de arte de la Universidad de Costa Rica, adquiridas en su día con el propósito de enseñar las técnicas de dibujo.

Con el fin de asegurar su conservación, Geraldine Conejo-Barboza, investigadora del Departamento de Química de la citada universidad y de su Instituto de Investigaciones en Arte, está diseñando con sus colaboradores un líquido pulverizable que elimine o frene el crecimiento del hongo y detenga el proceso natural de acidificación que está destruyendo las litografías. «Nuestra idea consiste en tomar la hidroxiapatita, una biomolécula que rebaja la acidez del papel y diseñar una molécula híbrida que también erradique los hongos», explica Conejo-Barboza. Planea incorporar óxido de cinc e iones de este mismo metal a la superficie de la molécula para que actúen como fungicidas.

Pero antes de aplicar el remedio, era preciso averiguar de qué enfermedad se trataba. Y para descubrir los microbios que están atacando las obras de arte, Max Chavarría, biólogo molecular del Centro Nacional de Innovaciones Biotecnológicas de Costa Rica, estudió una veintena del millar largo de litografías que forman la colección. Extrajo 21 muestras de hongos, dos de los cuales resultaron ser inéditos para la ciencia. «Fue una sorpresa hallar dos especies nuevas en un ambiente tan limitante», afirma Chavarría. Los recién descubiertos, *Periconia epilithographicola* y *Coniochaeta cipronana*, se describieron en mayo en *Scientific Reports*.

Conejo-Barboza ya ha sintetizado varios fungicidas que pretende poner a prueba en el laboratorio. Salomón Chaves, subdirector del Instituto de Investigaciones en Arte, ha dedicado los últimos cinco años a la restauración de las litografías. El nuevo producto tiene la ventaja de ser pulverizable, explica. Hasta ahora, proteger el papel contra la acidificación exige su baño en soluciones alcalinas y un secado esmerado, proceso que puede arrugar el papel si no se hace correctamente. Estos especialistas esperan que los nuevos productos neutralicen los microbios y la acidificación y resulten útiles para conservar las colecciones de otros lugares.

Aun así, los hongos no siempre son nocivos: su capacidad para degradar la celulosa (una sustancia correosa y dura propia de la pared de las células vegetales) es útil para tratar los residuos agrícolas procedentes de cultivos como la piña, el café o la caña azucarera.

—Debbie Ponchner

DEMOGRAFÍA

La brecha de género en Facebook

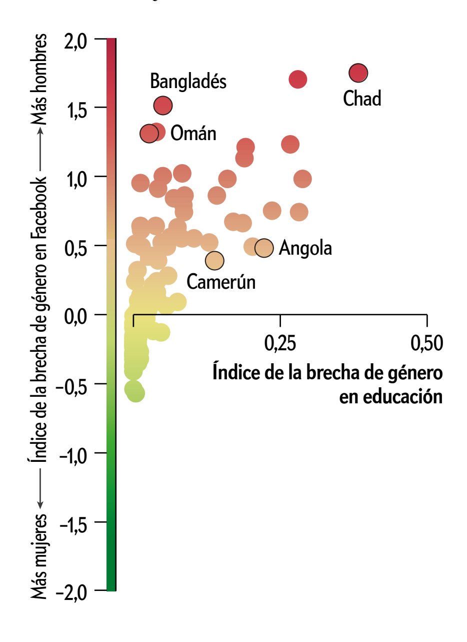
El uso de la red social se perfila como indicador de igualdad

Aparte de vídeos de gatos y fotos de bebés, las redes sociales también pueden proporcionar información demográfica útil. Un nuevo estudio ha encontrado que, en todo el mundo, la cantidad de mujeres que usan Facebook guarda una estrecha relación con otros índices de igualdad de género.

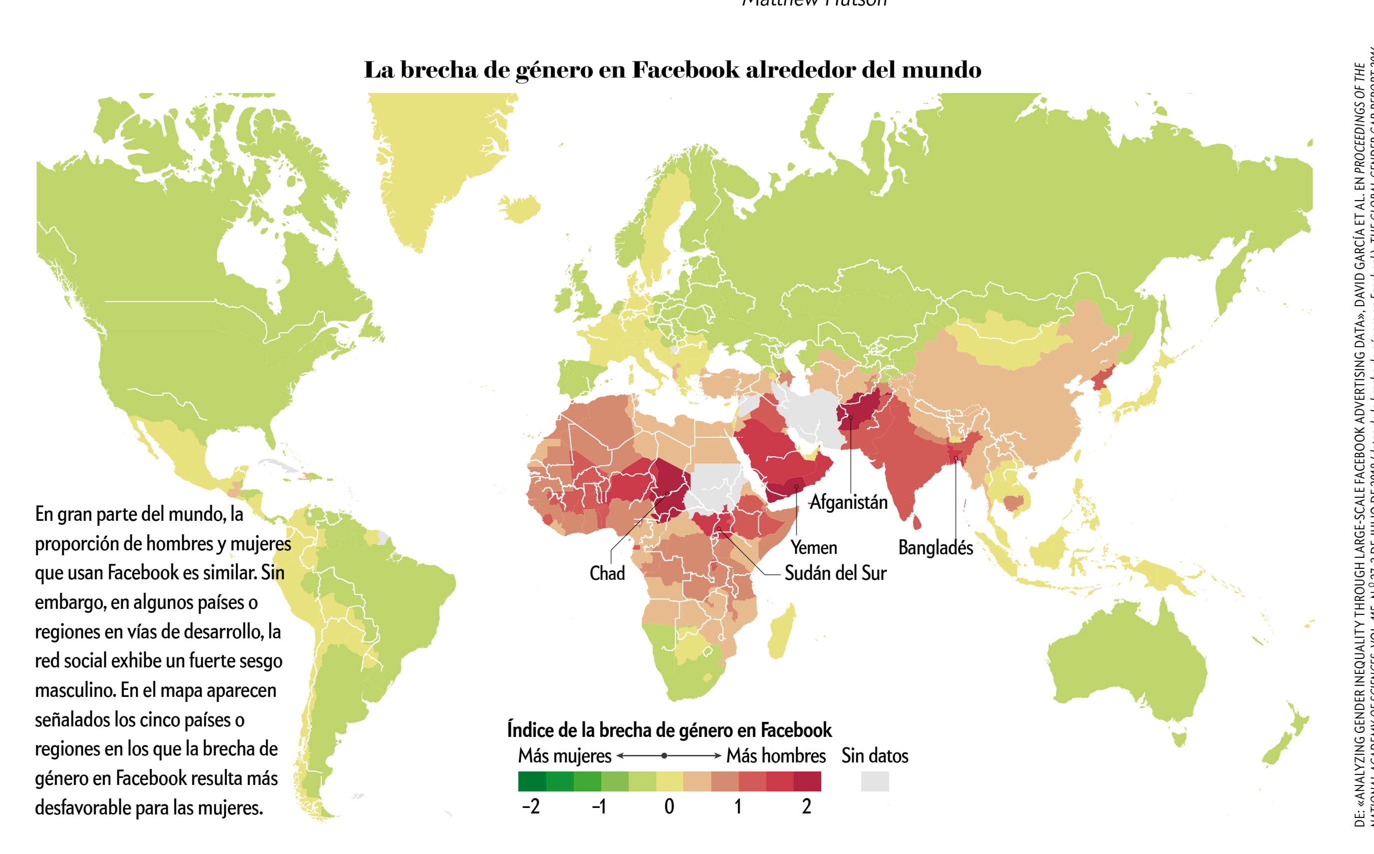
Los investigadores analizaron los datos anónimos de 1400 millones de usuarios de 217 países y territorios y calcularon la proporción de mujeres y hombres de entre 13 y 65 años que usaban activamente la red social. Aquellos lugares en los que el porcentaje de usuarias era menor fueron catalogados como poseedores de una mayor «brecha de género en Facebook» (*tonos rojizos*). Al mismo tiempo, los autores recopilaron datos del Foro Económico Mundial sobre igualdad de género en términos de oportunidades económicas, educación y salud. El estudio encontró que, cuanto menor era la brecha de género en Facebook de un país en 2015, más mejoraban sus índices de igualdad al año siguiente. Sin embargo, una mejora en estos últimos en 2015 no se reflejaba en una reducción de la brecha de género en Facebook en 2016. El hallazgo sugiere que una menor brecha de género en Facebook probablemente contribuya a la igualdad en términos generales, más que ser un resultado de ella. Los resultados se publicaron en julio en *Proceedings of the National Academy of Sciences* (*PNAS*).

Ridhi Kashyap, experta en demografía de la Universidad de Oxford que no participó en el estudio, ha publicado otro mapa de la brecha de género en Internet que también se basa en datos de Facebook. La investigadora descubrió que el uso de Facebook, sobre el que es relativamente sencillo obtener datos, constituye una buena medida del uso de Internet en general, mucho más difícil de cuantificar. Kashyap considera que Internet puede proporcionar información útil sobre salud y empleo, así como ayudar a mejorar las habilidades personales. David García, experto en ciencia social computacional de la Universidad Médica de Viena y autor principal del estudio de *PNAS*, sostiene que los datos de Facebook podrían ayudar a los organismos internacionales a estimar la desigualdad de género en aquellos países donde no existen buenos indicadores al respecto.

—*Matthew Hutson*



Para cada país o región, los investigadores compararon la brecha de género en Facebook con los distintos índices de igualdad que mide el Foro Económico Mundial. La correlación resultó ser especialmente importante en el caso de la brecha educativa.



En gran parte del mundo, la proporción de hombres y mujeres que usan Facebook es similar. Sin embargo, en algunos países o regiones en vías de desarrollo, la red social exhibe un fuerte sesgo masculino. En el mapa aparecen señalados los cinco países o regiones en los que la brecha de género en Facebook resulta más desfavorable para las mujeres.

DE: «ANALYZING GENDER INEQUALITY THROUGH LARGE-SCALE FACEBOOK ADVERTISING DATA», DAVID GARCÍA ET AL. EN *PROCEEDINGS OF THE NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES*, VOL. 115, N.º 27, 3 DE JULIO DE 2018 (*datos de la brecha de género en Facebook*); *THE GLOBAL GENDER GAP REPORT 2016*, FORO ECONÓMICO MUNDIAL, 2016 (*datos de la brecha de género en educación*); AMANDA MONTAÑEZ (*ilustración*)

ESPACIO

Un misterio lunar resuelto

La recuperación de varias cintas magnéticas perdidas revela la causa del calentamiento de la Luna

Cuando los astronautas del programa Apolo regresaron de la Luna en los años setenta, dejaron atrás dos pares de sondas de temperatura enterradas en la superficie. Su objetivo era medir el calor que emanaba del suelo, con la esperanza de inferir cuánto calor radiactivo generaba la Luna y descubrir así detalles de su actividad geológica reciente.

Aquellos detectores, alimentados con energía nuclear, transmitieron datos a la Tierra que fueron almacenados en cintas magnéticas. Los datos llegaron hasta 1977, pero el investigador principal, Marcus Langseth, solo los estudió hasta diciembre de 1974, ya que las cintas restantes se perdieron debido a errores burocráticos que impidieron localizarlas. Sin embargo, a lo largo del último decenio, un grupo de científicos ha estado registrando áticos, garajes e



instalaciones gubernamentales hasta que, por fin, han aparecido algunas de las cintas desaparecidas.

El informe de Langseth sobre los datos originales había revelado que el calor descendía desde la superficie del satélite, en vez de ascender desde el núcleo, como habría cabido esperar. Ello desencadenó varias teorías: que la presencia de los astronautas había calentado de algún modo la superficie; que los propios instrumentos habían generado un exceso de calor; o que la Luna estaba atravesando un ciclo de calentamiento prolongado. La incertidumbre implicaba que los científicos no podían fiarse de los resultados experimentales.

Ahora, las cintas recuperadas han demostrado que el calor viajó desde la superficie lunar hasta el fondo de las perforaciones donde se introdujeron las sondas. Ello ha permitido descartar todas las explicaciones excepto la que postulaba que fueron los propios astronautas los que alteraron la superficie del satélite. Sus huellas y el paso de los vehículos lunares comprimieron y oscurecieron la superficie. «Fue la [absorción de la] luz del Sol allí donde caminaban los astronautas lo que hizo que la Luna se calentara en esos lugares», asegura Walter Kiefer, investigador del Instituto Lunar y Planetario de Houston y coautor del trabajo. Los resultados se publicaron el pasado mes de mayo en la revista *Journal of Geophysical Research: Planets*.

Estos hallazgos sugieren que las mediciones realizadas al comienzo de los experimentos, cuando el calor todavía se concentraba cerca de la superficie, eran las más fiables, lo que significaría que los datos originales eran correctos. «Ahora sabemos que podemos fiarnos de esas mediciones hasta un punto del que no estábamos seguros hace unos años», concluye Kiefer.

—Nola Taylor Redd

SALUD

Detección del cáncer de colon

Las directrices para el cribado de este tipo de tumores deberían ser individualizadas

Nadie espera con impaciencia la primera colonoscopia, pero no es menos cierto que esta exploración del intestino es una de las armas más poderosas contra el cáncer de colon. Ahora bien, el protocolo que señala en qué momento es conveniente comenzar con ella podría llegar demasiado tarde para muchos hombres y podría hacer pasar un mal trago innecesario y caro a multitud de mujeres, apunta un nuevo estudio.

Los médicos aconsejan a los hombres y las mujeres sin antecedentes familiares de cáncer de colon u otros factores de riesgo que comiencen a someterse a la prueba a los 50 años, o bien antes si se hallan en situación de riesgo. Pero esta amplia directriz pasa por alto las diferencias individuales que determinan la herencia y los hábitos de cada cual.

Con el propósito de calcular la edad idónea del primer examen, investigadores del Centro de Investigación Oncológica Fred Hutchinson, en Seattle, y otros colaboradores analizaron los datos de pacientes con 19 patrones de conducta distintos (actividad física, consumo de alcohol y de carnes rojas, índice de masa corporal y toma de aspirina, entre otros aspectos) y 63 marcadores genéticos ligados al cáncer colorrectal.

Los resultados indican que el 15 por ciento de los varones sin antecedentes familiares deberían comenzar a someterse a las colonoscopias antes de cumplir los 45 años, mientras que la mitad de las mujeres carentes de tales antecedentes podrían aguardar hasta por lo menos los 56, y el 10 por ciento de ellas incluso hasta los 64 años. Trece años de datos aportados por participantes de ascendencia europea revelan que la terapia de restitución hormonal reduce el riesgo de cáncer en las mujeres, que los hombres son más propensos a incurrir en conductas de riesgo, como el consumo de alcohol o el tabaquismo, y que el sobrepeso agrava el riesgo en ambos sexos.

Las conclusiones del estudio, publicadas el pasado junio en *Gastroenterology*, también ponen en duda la premisa de que los antecedentes familiares exigen siempre iniciar el examen a edades más tempranas. Los investigadores constataron que más de la mitad de las féminas —y el 15 por ciento de los varones— con antecedentes familiares podían esperar hasta los 50 para someterse a la primera colonoscopia. Estos hallazgos constituyen un paso adelante hacia las personalización de las pruebas de detección, pero no deben tomarse como un consejo médico, advierte Jihyoun Jeon, de la Universidad de Michigan, autor principal del artículo.

«El estudio es relevante porque los modelos [de la enfermedad] no suelen combinar los datos genéticos y los hábitos para predecir el riesgo de padecer cáncer de colon», afirma Brian Wells, bioestadístico de la Facultad de Medicina de Wake Forest que ha permanecido al margen de la investigación. «Pero los autores no indican cuántas colonoscopias permite ahorrar y cuántos tumores colorrectales permite prevenir el modelo, ni lo comparan con las directrices vigentes. Y esa comparación es necesaria para evaluar el balance real de beneficios y riesgos.»

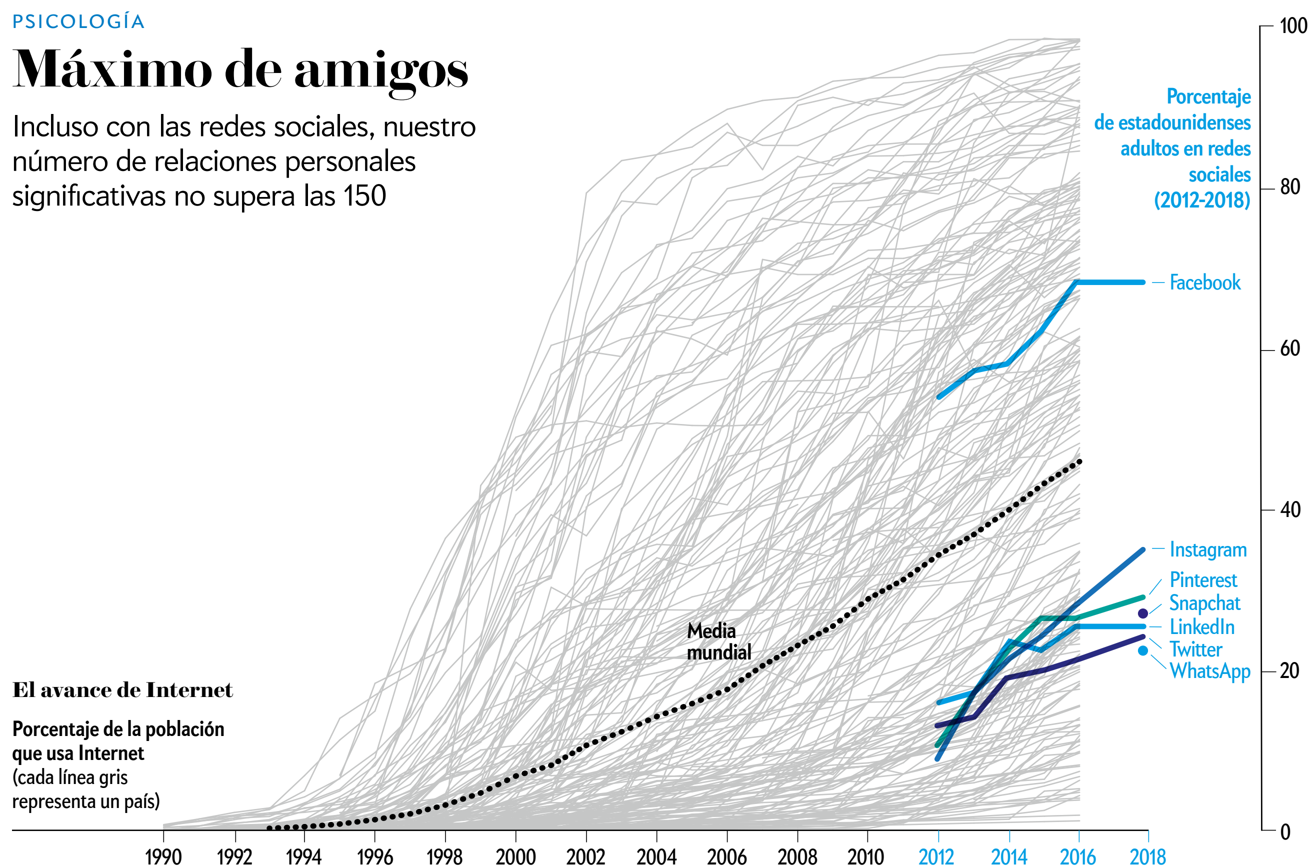
—Heather Stringer

GETTY IMAGES

PSICOLOGÍA

Máximo de amigos

Incluso con las redes sociales, nuestro número de relaciones personales significativas no supera las 150



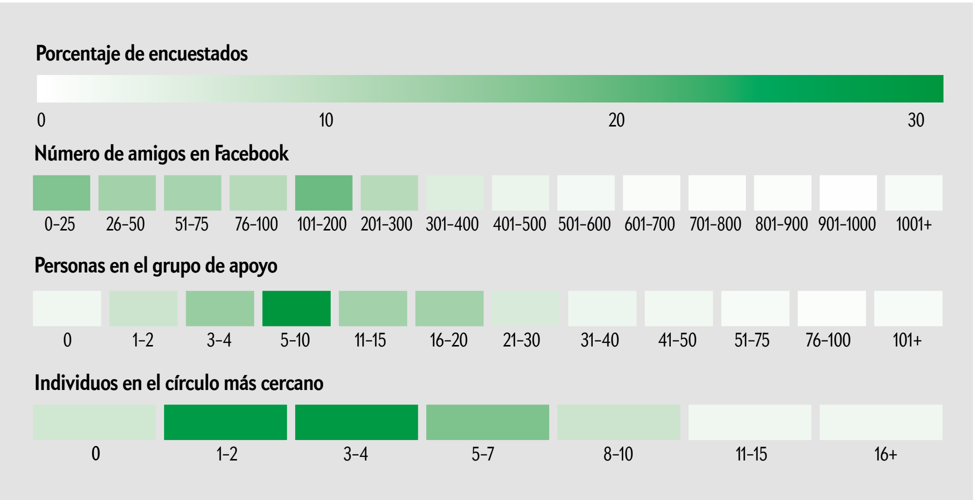
Los humanos somos criaturas extremadamente sociales. Los antropólogos sostienen que nuestra naturaleza hipersocial nos ha ayudado a convertirnos en la especie dominante que somos. Hoy, las redes sociales permiten que un gran porcentaje de personas de todo el mundo se comuniquen sin esfuerzo (*arriba*), algo que no puede hacer ningún otro animal.

Sin embargo, a pesar de tener cientos de amigos en Facebook y miles de seguidores en Twitter, los científicos aseguran que nos estamos engañando. En realidad, no somos capaces de mantener más de 150 relaciones significativas al mismo tiempo. Diferentes estudios han confirmado que la mayoría de las personas tienen unos 5 amigos íntimos, 15 buenos amigos, 50 amigos lejanos y unos 150 conocidos (*abajo*). Robin Dunbar, psicólogo evolutivo de la Universidad de Oxford que ya había deducido esas mismas cifras en la década de 1990, puso a prueba sus conclusiones previas en un estudio basado en miles de usuarios de Facebook. A pesar de la explosión de las redes sociales, nuestra red de contactos importantes sigue teniendo un límite de unos 150. Dunbar explica que dicho umbral podría estar determinado por el tamaño y la química del cerebro, así como por el tiempo que lleva mantener relaciones significativas. «El tiempo que dedicamos a ellas es clave», añade.

—Mark Fischetti

La prueba de Facebook

En un estudio realizado por Dunbar, se preguntó a 2000 adultos que usaban las redes sociales con regularidad cuántos amigos tenían en Facebook. Luego se les preguntó a cuántos considerarían amigos íntimos (su círculo más cercano) y a cuántos acudirían en busca de consejo en momentos delicados (su grupo de apoyo). Las respuestas reproducen los resultados de los estudios anteriores al auge de las redes sociales: la mayoría de las personas tienen alrededor de 5 amigos íntimos, 15 personas en su grupo de apoyo y 150 conocidos.



DE: UNIÓN INTERNACIONAL DE TELECOMUNICACIONES, BASE DE DATOS E INFORME SOBRE EL DESARROLLO MUNDIAL DE LAS TELECOMUNICACIONES (*datos sobre el uso de Internet*); CENTRO DE INVESTIGACIONES PEW (*datos sobre redes sociales*); «DO ONLINE SOCIAL MEDIA CUT THROUGH THE CONSTRAINTS THAT LIMIT THE SIZE OF OFFLINE SOCIAL NETWORKS?», R. I. M. DUNBAR EN *ROYAL SOCIETY OPEN SCIENCE*, VOL. 3, ART. 150292, ENERO DE 2016 (*datos sobre el estudio de amigos en Facebook*); JEN CHRISTIANSEN (*gráficos*)

ECOLOGÍA

Rumores de las profundidades

Los monitores de pruebas nucleares detectan ballenas en lugar de bombas

Algunos secretos de las ballenas están saliendo a la luz gracias a una fuente inesperada: los equipos encargados de detectar pruebas de armas nucleares. La red de hidrófonos submarinos de la Comisión Preparatoria de la Organización del Tratado de Prohibición Completa de los Ensayos Nucleares (OTPCE) fue diseñada para escuchar enormes explosiones. Sin embargo, lo que sus sensores sónicos captan más a menudo son los pacíficos murmullos de los mayores animales del mundo. Ahora, los científicos están aprovechando este singular conjunto de datos para calcular los movimientos de los rorcuales comunes y el tamaño de sus poblaciones. Ello podría servir para mejorar las inciertas perspectivas de conservación de esta especie.

En los últimos 20 años, la OTPCE ha instalado once estaciones acústicas en todo el mundo, seis de ellas en los océanos. Cada una contiene dos conjuntos de tres hidrófonos que reciben las señales y determinan su origen. Las observaciones de la OTPCE ayudaron a detectar las pruebas nucleares de Corea del Norte en 2017 y han aportado un auténtico botín de datos científicos.

Las grabaciones están revelando detalles sobre los rorcuales, una especie amenazada que se recupera de la caza sufrida durante el siglo XX. Tarun Chandrayadula, investigador del Instituto de Tecnología de la India, en Madrás, y sus colaboradores detectaron rorcuales comunes en las grabaciones que la OTPCE realizó cerca del extremo sur del país, una zona de la que nadie sabía que fuera frecuentada por esta especie. El hallazgo, en cuya publicación trabaja actualmente Chandrayadula, ha dado un empujón a sus intentos de elaborar un «atlas de ballenas» que detalle los movimientos anuales de los cetáceos del océano Índico.

Los datos de la OTPCE pueden ayudar también a determinar el tamaño de las poblaciones de ballenas, un requisito indispensable para que los esfuerzos de conservación resulten eficaces. Danielle Harris, bióloga marina de la Universidad de St. Andrews, en Escocia, lideró un estudio publicado en mayo que presentaba un nuevo método para estimar el número de ballenas utilizando la red dispersa de hidrófonos de la OTPCE. Harris calcula que hay aproximadamente un rorcual común por cada 2000 kilómetros cuadrados cerca de la isla Wake, un atolón del Pacífico central.

«El primer paso es saber cuántos animales estamos tratando de conservar», señala Sean Wiggins, experto del Instituto Scripps de Oceanografía que no participó en el estudio de Harris ni en el de Chandrayadula. Con todo, los datos de la OTPCE tienen sus limitaciones, añade Wiggins. Los hidrófonos detectan sonidos por debajo de los 100 hercios, por lo que no pueden captar las vocalizaciones de las ballenas pequeñas o de los delfines. Además, los enormes espacios que hay entre las estaciones de hidrófonos hacen que resulte difícil determinar la distancia a la que se encuentra una ballena de un sensor, un problema que el nuevo método de Harris trata de resolver.

Aun así, los 15 años de conversaciones entre ballenas de todo el mundo registradas por la OTPCE son una bendición para los biólogos marinos. Y también una fuente de felicidad: «Creo que no hay nada más divertido que sentarme en mi escritorio a escuchar a estas extraordinarias criaturas», confiesa Chandrayadula.

—Daniel Ackerman



REINHARD DIRSCHLER/GETTY IMAGES *(ballena)*; ROS FILM FESTIVAL 2018 *(cartel festival)*



AGENDA

CONFERENCIAS

6 de septiembre
SIM ES 2018
Jornada de charlas del evento Clubes de Ciencia
Parque de las Ciencias
Granada
www.clubesdeciencia.es

24 de septiembre
El creciente poder de la criomicroscopía electrónica
Richard Henderson, premio nóbel de química 2017
Fundación Ramón Areces
Madrid
www.fundacionareces.es

EXPOSICIONES

A partir del 20 de septiembre
¡Peligro! Salvados por la tecnología
Museo de la Ciencia y de la Técnica de Cataluña
Terrassa
mnactec.cat

OTROS

Concurso de tecnología y robótica
Jóvenes Inventores
Para estudiantes de ESO de toda España
Convoca: Fnac
www.fnac.es/concurso-jovenes-inventores

13-16 de septiembre — Jornadas
Naukas Bilbao 2018
Charlas y talleres
Palacio Euskalduna
Bilbao
naukas.com

14 y 15 de septiembre
ROS Film Festival 2018
Maratón de robótica, cine y comunicación
Las Naves
Valencia
rosfilmfestival.com



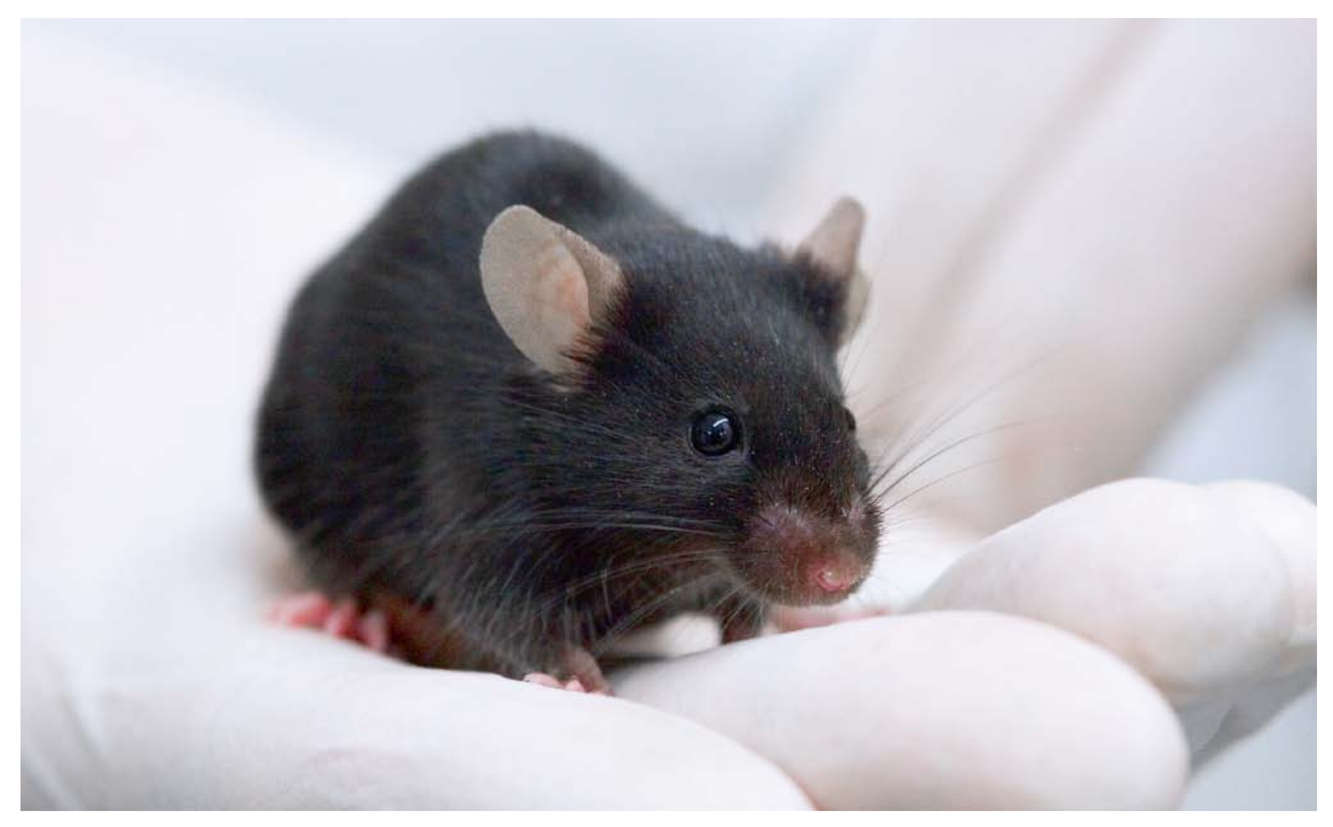
28 de septiembre — Jornada
Noche Europea de los Investigadores
Numerosas actividades en todo el territorio nacional
lanochedelosinvestigadores.es

MEDICINA REGENERATIVA

Frenar el envejecimiento mediante la reprogramación celular

Una estrategia novedosa alarga la vida de los ratones y mitiga los síntomas asociados a la edad

ELENA VICARIO ORRI Y ERIC VÁZQUEZ-FERRER



LA REPROGRAMACIÓN PARCIAL de las células logra revertir algunos signos del envejecimiento en los ratones. Mejora la capacidad de regeneración de algunos órganos, corrige ciertas alteraciones de los tejidos y alarga la esperanza de vida.

Obtener cualquier tipo de célula en una placa de Petri, estudiar las etapas tempranas del desarrollo humano o incluso generar órganos en el laboratorio son algunas de las posibilidades que nos brindan las células madre. Estas se definen como aquellas que tienen la capacidad de regenerar un organismo pluricelular completo. Antes de 2006, las células madre empleadas en el laboratorio procedían de material embrionario, con sus obvias limitaciones éticas. Por este motivo, el descubrimiento de la reprogramación celular en 2006 revolucionó el campo de la medicina regenerativa.

El logro lo protagonizó un grupo de investigadores liderado por Shinya Yamanaka, de la Universidad de Kyoto, quien en 2012 recibió por ello el premio Nobel de fisiología o medicina. El equipo demostró que, al incorporar a las células cuatro genes que codificaban unas moléculas conocidas desde entonces como factores de Yamanaka, podía convertir células de la piel a un estadio de pluripotencia parecido al de las células embrionarias. El proceso se conoce como reprogramación celular, y las células generadas se llaman células madre pluripotenciales inducidas. Estas células han abierto en gran medida el abanico de posibilidades en el campo de la biomedicina. Entre otras aplicaciones, se han empleado para modelizar enfermedades o para valorar la eficacia de fármacos en determinadas dolencias.

Pero, por encima de todo, el descubrimiento de la reprogramación celular supuso un cambio de paradigma en el campo de la medicina regenerativa. La visión de que el desarrollo embrionario era un proceso unidireccional, en el que unas células pluripotenciales se diferenciaban y adquirían un destino celular concreto e irreversible, fue reemplazada por la idea de que se trataba de un

proceso maleable e incluso bidireccional. La reprogramación ha revelado que las células adultas o diferenciadas, como las cutáneas, pueden rejuvenecerse y regresar a un estadio de pluripotencia desde el cual pueden autorrenovarse y dar lugar a tipos diversos de células, como las del hígado, de los músculos o nuevamente de la piel.

Ese avance ha implicado el replanteamiento del envejecimiento, también considerado desde siempre un fenómeno unidireccional e inevitable. Si se puede convertir una célula diferenciada en una pluripotencial como las de los embriones; es decir, si se la devuelve a su punto de partida, ¿es posible entonces rejuvenecer las células, algo que no exige retroceder tanto en el tiempo? ¿Y un organismo entero? ¿Existe la posibilidad de frenar o revertir el envejecimiento?

En estudios dirigidos por Juan Carlos Izpisúa Belmonte, en el laboratorio de Expresión Génica del Instituto Salk de Estudios Biológicos en San Diego, y en los que participó uno de nosotros (Vázquez-Ferrer) se demostró que la activación intermitente de los mencionados factores de Yamanaka, normalmente asociados a un estadio embrionario, puede revertir las características de la vejez en ratones vivos. Los resultados de esos estudios, publicados en 2016 en *Cell* y en *Trends in Molecular Medicine*, no solo han ofrecido información sobre los mecanismos celulares que impulsan el envejecimiento, sino que también apuntan a posibles enfoques terapéuticos para mejorar la salud humana y la longevidad. Desde entonces, otras publicaciones más recientes han confirmado el rol crucial de los cambios epigenéticos en el mecanismo de reversión del envejecimiento y han profundizado en la reprogramación in vivo de células específicas de un tejido para recuperar la pérdida de función, y alargar así, indirectamente, la esperanza de vida.

Rejuvenecer células in vitro

El envejecimiento puede definirse como el deterioro progresivo en la capacidad que tienen una célula o un organismo para resistir el estrés, los daños o las enfermedades. Representa el mayor factor de riesgo para la mayoría de las enfermedades: a medida que se cumplen años, va aumentando el riesgo y la vulnerabilidad de padecer enfermedades cardiovasculares y neurodegenerativas, cáncer y obesidad, entre otras dolencias; y también empeora su pronóstico. Por esta razón, conseguir revertir el envejecimiento o ralentizarlo ha atraído una gran atención de la comunidad científica.

Los recientes avances en reprogramación celular han permitido analizar el envejecimiento en el laboratorio, tanto el fisiológico (por causas naturales) como el patológico (producido por enfermedades). De este modo, se han reprogramado in vitro fibroblastos (un tipo de células del tejido conjuntivo) de individuos centenarios o de pacientes con progeria, una enfermedad en la que los afectados envejecen de modo acelerado desde el nacimiento. Las células reprogramadas muestran una mejoría en varios rasgos propios del envejecimiento: disminuye la concentración de proteínas que regulan la senescencia celular y los niveles de estrés oxidativo, los telómeros (extremos de los cromosomas) se alargan y las marcas epigenéticas (modificaciones químicas del ADN) desaparecen. Se ha logrado, por tanto, un rejuvenecimiento de las células en el laboratorio.

Pero si bien existen numerosos estudios que han demostrado que la reprogramación celular revierte la edad de las células en placas de Petri, el paso que supone la reprogramación celular en organismos enteros vivos plantea un reto mucho más difícil.

El salto de in vitro a in vivo

La posibilidad de reprogramar células en animales vivos usando los factores de Yamanaka fue descrita por primera vez en 2013 en *Nature* por el grupo de Manuel Serrano, entonces en el Centro Nacional de Investigaciones Oncológicas. Los investigadores crearon unos ratones, a los que se denominó 4F, que eran portadores de los cuatro factores de Yamanaka. La activación de esos factores está controlada por un gen que, a su vez, puede activarse a través de la administración de una sustancia, la doxiciclina, la cual se ofrece a los ratones con la bebida. Los investigadores demostraron que era posible poner en marcha la reprogramación celular en los ratones mediante la administración de la doxiciclina.

Sin embargo, este y otros intentos de inducir la reprogramación celular en animales vivos se habían topado siempre con el mismo problema: las células reprogramadas tendían a dividirse más rápido, lo que daba lugar a la aparición de teratomas (tumores que contienen células o tejidos de las tres capas germinales). Como consecuencia, los animales sufrían una elevada mortalidad.

En nuestros estudios dirigidos por Izpisúa Belmonte, nos propusimos asimismo reprogramar células en ratones vivos y buscamos la manera de evitar ese inconveniente. En primer lugar, trabajamos con ratones que eran portadores de los factores de Yamanaka (4F) y a los que, además, se les había introducido una mutación en el gen *Lmna* que provoca la progeria. Estos ratones viven menos tiempo y muestran numerosos síntomas asociados a la edad, como la pérdida de peso o la alteración de varios órganos.

En la reprogramación celular de los ratones con progeria, estudiamos distintas combinaciones en las que variamos el número de copias de los genes de los factores de Yamanaka y el número de días de inducción de los factores (que controlamos mediante la administración de la doxiciclina). En concordancia con los experimentos anteriores, si inducíamos los factores de Yamanaka durante cuatro días consecutivos, los ratones sufrían una gran pérdida de peso y una alta mortalidad, seguramente propiciadas por la desdiferenciación (pérdida de identidad) de las células y la posterior disfunción de los órganos vitales.

El protocolo que pareció más adecuado fue el de inducir la expresión de los factores de forma cíclica, dejándolos activos durante dos días e inactivándolos durante los cinco días siguientes. De este modo, con solo dos días de tratamiento ya se podían detectar los factores en la sangre de los ratones, pero ello no se traducía en una pérdida de peso ni en mortalidad, aun repitiendo el ciclo hasta 35 veces. Tampoco observamos signos de cáncer o pluripotencia en ninguno de los órganos que estudiamos. Asimismo, descubrimos una gran diferencia entre los ratones que llevaban una sola copia del transgén de los factores de Yamanaka y los que llevaban dos copias. Por último, comprobamos que ocho semanas de inducción cíclica de los factores en ratones con dos copias sí que originaba un incremento de la proliferación celular y provocaba la formación de teratomas en el hígado, los riñones y el páncreas.

Reprogramación incompleta

El primer punto que destacar es que nuestra estrategia, la inducción corta de los factores de Yamanaka, logró una repro-

gramación celular parcial. Lo comprobamos cuando, al aislar fibroblastos de los ratones, observamos que no habían recuperado el estadio de pluripotencia (el destino final de la reprogramación), ya que no presentaban marcadores (moléculas características) de pluripotencia. En cambio, las células reprogramadas seguían manteniendo su identidad original, puesto que todavía expresaban algunos marcadores propios de los fibroblastos. Este logro reviste especial importancia, porque la reprogramación parcial puede aportar el beneficio de eliminar los fenotipos propios del envejecimiento sin que las células pierdan su identidad y función. Otra ventaja añadida es que no propicia la formación de tumores.

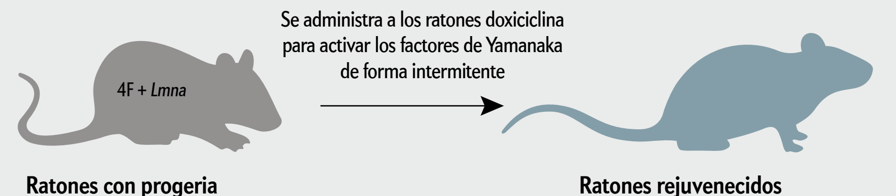
Una vez demostrado que la administración cíclica de doxiciclina evitaba las consecuencias negativas de la reprogramación celular in vivo, estudiamos los cambios relacionados con el envejecimiento. Aunque los ratones Laki 4F siguieron mostrando su característica pérdida de peso, observamos en ellos un notable incremento de la esperanza de vida, ya que vivieron un 30 por ciento más que los animales con progeria no sometidos al tratamiento. Además, varios de sus tejidos experimentaron una mejoría: los correspondientes al aparato digestivo tenían mucha mejor apariencia, la renovación celular aumentó en muchos órganos, como el estómago, los riñones o la piel, y se restauró el número de células satélite del músculo (las encargadas de regenerar el tejido).

Uno de los principales problemas que sufren los ratones con progeria son las alteraciones cardiovasculares. Pero, después de la reprogramación celular, incluso este problema se mitigó y no se observó el característico desarrollo de la bradicardia, o ritmo cardíaco lento, según mostraban los análisis por electrocardiograma. Finalmente, también presentaban una menor expresión de la proteína beta-galactosidasa, un marcador asociado a la senescencia. Es importante destacar que todos estos cambios, que apuntan a una reversión de los fenotipos propios del envejecimiento, son independientes a la proteína progerina, la causante del síndrome de enve-

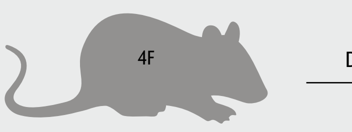
REPROGRAMACIÓN CELULAR PARCIAL

AL APLICAR A RATONES ENVEJECIDOS una variante de la técnica de reprogramación celular desarrollada por el premio nóbel Shinya Yamanaka, los investigadores han conseguido mejorar ciertas deficiencias asociadas a la edad. La nueva estrategia consiste en reprogramar las células de los animales pero no hasta el final, sino de forma incompleta, activando los factores de Yamanaka de modo intermitente.

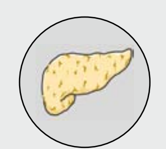
Se ha trabajado con ratones transgénicos cuyas células llevan cuatro genes correspondientes a los factores de Yamanaka (4F). A un grupo de estos ratones se les introduce, además, una mutación (*Lmna*) que les provoca progeria (envejecimiento prematuro), mientras que a otro grupo de ratones se los deja envejecer de forma natural.



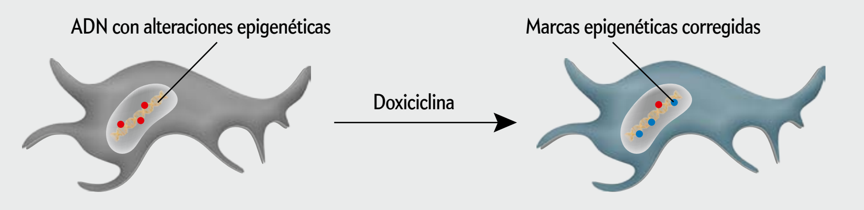
- Mayor esperanza de vida (30 %)
- Menores niveles de moléculas asociadas a la senescencia (beta-galactosidasa)
- Mejoran las alteraciones cardiovasculares (bradicardia)







- Mejora la capacidad de regeneración en órganos como el músculo y el páncreas



- En los ratones tratados se observa una corrección de las marcas epigenéticas (*azul*)
- Las células se rejuvenecen, pero sin alcanzar el estado final de pluripotencia ni perder su identidad y funciones

En las células de los dos grupos de ratones envejecidos, el número y la posición de las marcas epigenéticas, unas moléculas que se añaden al genoma y regulan la expresión de los genes, se hallan alteradas (*rojo*).

INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, SEGÚN LOS AUTORES

jecimiento acelerado en estos ratones. Más bien se deben a una remodelación de las marcas epigenéticas, una serie de marcas químicas que se acumulan sobre el genoma y controlan la expresión de los genes sin alterarlos en sí mismos.

Por último, para estudiar el envejecimiento fisiológico (natural) utilizamos ratones 4F y los dejamos envejecer. Nos fijamos a continuación en dos rasgos característicos de los ratones envejecidos. El primero hace referencia al páncreas. Con la edad, las células beta de este órgano tienen menos capacidad de regeneración. En cambio, los ratones sometidos a la reprogramación celular se recuperaban mejor del daño pancreático y mostraban en general una mejor función del órgano, cosa que no ocurrió en los ratones en los que no se activaron los factores de Yamanaka. El segundo rasgo que investigamos fue la sarcopenia, la pérdida de masa muscular asociada al envejecimiento. En este caso, administrando la doxiciclina intramuscularmente para inducir la reprogramación celular, los ratones viejos mostraron una expansión de las células madre del músculo, capaces de regenerar el tejido muscular dañado.

Llegados aquí, la pregunta fundamental que uno se plantea es: ¿nos hallamos más cerca ahora de la juventud eterna? Nuestro trabajo ofrece pruebas de que el envejecimiento no es un proceso unidireccional y podría ser aliviado si sacamos provecho de la plasticidad celular in vivo. La reprogramación aplicada a ratones vivos constituye un gran avance respecto a la realizada en cultivos celulares, y ello abre las puertas a prometedoras estrategias contra el envejecimiento. Sin embargo, su aplicación en humanos todavía queda lejos. Hay un largo camino por recorrer para averiguar de forma exacta el mecanismo de rejuvenecimiento observado en las células de los animales tratados, así como para encontrar un método viable en la práctica clínica.

Elena Vicario Orri, *doctora en biomedicina, trabaja en la revista* Frontiers*, en Londres.*

Eric Vázquez-Ferrer *realizó sus estudios de doctorado en el Instituto Salk de Estudios Biológicos, en San Diego, California. Actualmente es investigador posdoctoral en el Instituto MRC de Ciencias Médicas del Imperial College, en Londres.*

PARA SABER MÁS

Reprogramming in vivo produces teratomas and iPS cells with totipotency features. María Abad et al. en *Nature*, vol. 502, págs. 340–345, octubre de 2013.

Anti-aging strategies based on cellular reprogramming. A. Ocampo, P. Reddy y J. C. Izpisúa Belmonte en *Trends in Molecular Medicine*, vol. 22, págs. 725-738, agosto de 2016.

In vivo amelioration of age-associated hallmarks by partial reprogramming. A. Ocampo et al. en *Cell*, vol. 167, págs. 1719-1733, diciembre de 2016.

EN NUESTRO ARCHIVO

El poder terapéutico de nuestras células. Konrad Hochedlinger en *IyC*, julio de 2010.

Una década de reprogramación celular. Megan Scudellari en *IyC*, octubre de 2016.

CLIMA

Los ciclones tropicales se ralentizan

En las últimas siete décadas, la velocidad a la que se desplazan los ciclones tropicales ha disminuido. El fenómeno podría causar inundaciones al aumentar la cantidad de precipitaciones tormentosas

CHRISTINA M. PATRICOLA

Los ciclones tropicales figuran entre las catástrofes más letales y costosas. Su poder destructivo no solo deriva de los fuertes vientos, sino también de las inundaciones y de las coladas de barro asociadas a las marejadas ciclónicas y a las intensas lluvias. La cantidad total de precipitaciones tormentosas en una región puede ser extrema con independencia de la velocidad máxima del viento, ya que resulta proporcional a la tasa de pluviosidad e inversamente proporcional a la velocidad de traslación del ciclón; es decir, a la rapidez con que este atraviesa la zona.

En el pasado, algunos estudios habían analizado la evolución de las lluvias torrenciales asociadas a los ciclones tropicales del último siglo y su proyección futura. Sin embargo, la velocidad de avance no había recibido tanta atención. En un artículo publicado hace poco en *Nature*, James Kossin, de la Administración Nacional de la Atmósfera y los Océanos (NOAA) de EE.UU., ha estudiado los cambios en este parámetro a escala global, así como las variaciones regionales sobre cuencas oceánicas concretas. Su trabajo concluye que la velocidad a la que se desplazan los ciclones ha disminuido, lo que sugiere que la cantidad total de precipitaciones regionales asociadas a estos fenómenos podría haber aumentado.

En su artículo, Kossin ha analizado 68 años de observaciones realizadas entre 1949 y 2016, el período más largo para el que existen datos a escala global. En ese tiempo, la incertidumbre asociada a la velocidad de traslación es mínima, ya que la ubicación de los ciclones se conoce con gran exactitud. Por el contrario, identificar tendencias en el número y la intensidad de los ciclones resulta más difícil, ya que algunos de ellos no podían detectarse en la época previa a la llegada de los satélites, en los años setenta del siglo pasado. Kossin ha inferido una disminución del 10 por ciento en la velocidad de traslación de los ciclones tropicales a lo largo de ese período: una tendencia que supera rigurosos tests estadísticos y que se encuentra dominada por los ciclones oceánicos.

El autor concluye que los cambios en la velocidad de avance de los ciclones generados sobre terreno continental (de mayor relevancia para la sociedad que los que se producen en el océano) varían notablemente por regiones. No se trata de un hecho sorprendente, ya que solo el 10 por ciento de los datos originales corresponden a tales ciclones, y categorizarlos por zonas reduce aún más el conjunto de datos, lo que dificulta separar cualquier posible tendencia del ruido estadístico. Con todo, el estudio sí observa una ralentización estadísticamente significativa, la cual



EL HURACÁN HARVEY, visto desde el espacio. En 2017, este ciclón devastó distintas zonas de EE.UU. y afectó a varios Estados del Caribe. Su inusual poder destructivo se debió en parte a su lentitud. Ahora, un estudio ha hallado que la velocidad media a la que avanzan los ciclones tropicales ha estado disminuyendo en los últimos 70 años.

NASA/SPL

ascendería a entre el 20 y el 30 por ciento en grandes regiones continentales próximas al noroeste del Pacífico, el norte del Atlántico y los alrededores de Australia.

El nuevo trabajo pone de manifiesto la importancia de considerar la influencia de la circulación atmosférica global en el total de las precipitaciones ciclónicas tropicales. Los ciclones «se dejan llevar por la corriente», lo que implica que la dirección y la velocidad a la que se desplazan están regidas por los vientos circundantes. Por tanto, cualquier alteración en la circulación tropical podría afectar a su velocidad de avance.

Preguntas abiertas

Una de las limitaciones del estudio es que deja abierta la cuestión relativa a las precipitaciones derivadas de los ciclones tropicales. La termodinámica nos dice que, cuando la atmósfera se calienta un grado Celsius, la cantidad de humedad que puede retener aumenta en un 7 por ciento. Por tanto, el calentamiento global puede causar un incremento de las lluvias. Sin embargo, no está claro si el volumen total de las precipitaciones regionales asociadas a los ciclones tropicales muestra tendencias estadísticamente robustas, ni tampoco en qué medida la disminución de la velocidad de traslación descrita por Kossin podría influir en tales tendencias.

En general, la disponibilidad y la calidad de los datos dificultan entender lo que ocurre con las precipitaciones. Por un lado, tanto la distribución espacial de los pluviómetros como las mediciones efectuadas por radar varían regionalmente; por otro, las observaciones por satélite están limitadas a las últimas décadas, y deben analizarse partiendo de una serie de supuestos para extraer los datos de lluvias. No obstante, si se obtienen resultados similares para un mismo período a partir de diferentes fuentes de datos, cualquier tendencia observada en las precipitaciones podrá considerarse robusta.

Los hallazgos de Kossin plantean otros interrogantes, sobre todo en lo que se refiere a los ciclones «estancados». Estos resultan particularmente destructivos por exhibir una velocidad de avance muy baja (como el tifón Morakot, que en 2009 se desplazó por Taiwán a tan solo 5 kilómetros por hora), una trayectoria que ondula o describe varios bucles sobre una misma región (como el ciclón Hyacinthe, que atravesó tres veces la isla Reunión en 1980), o ambas cosas (como el huracán Harvey, que serpenteó por la costa de Texas en 2017). Según el autor, la probabilidad de hallar ciclones tropicales con velocidades de traslación inferiores a los 20 kilómetros por hora es mayor durante la segunda mitad del período de

observación. Sin embargo, se desconoce si los ciclones estancados se han vuelto más frecuentes, así como hasta qué punto podrían contribuir la variabilidad natural y el cambio climático antropogénico a una mayor recurrencia. Tampoco está claro si la incidencia de los ciclones tropicales variará en un futuro.

Tal y como señala el estudio, parte de la dificultad que entraña entender la variabilidad y los cambios en la incidencia de ciclones tropicales estancados se debe a la falta de datos. Además, al tratarse de ciclones relativamente poco frecuentes, resulta difícil evaluar si se observan tendencias estadísticamente significativas en los pocos datos disponibles. Los métodos estadísticos facilitan la cuantificación de posibles tendencias, pero, en ocasiones, no resultan del todo adecuados para comprender las causas físicas.

Ciclones y clima global

Los modelos climáticos dinámicos a escala global ofrecen una solución al problema de intentar entender qué ocurre con los ciclones tropicales estancados. Las simulaciones por ordenador permiten representar climas tanto actuales como futuros modificando las cantidades de aerosoles y de gases de efecto invernadero que intervienen en dichos modelos. Estos pueden también emplearse para diferenciar entre la variabilidad natural y el cambio antropogénico. Hoy, los avances en supercomputación hacen posible elaborar un mayor número de simulaciones climáticas globales que incluyan fenómenos como los ciclones tropicales. En consecuencia, y aunque los modelos no sean perfectos, las colaboraciones entre quienes estudian este tipo de ciclones y quienes desarrollan simulaciones climáticas de alta resolución están generando datos de gran valor.

Por ejemplo, ya existen programas informáticos capaces de identificar con rapidez ciclones tropicales entre los petaoctetos de datos que arrojan los modelos generados por tales colaboraciones. Por otro lado, si bien los modelos climáticos globales de baja resolución no consiguen representar bien los ciclones tropicales, se han desarrollado modelos dinámicos estadísticos que, como parámetros de entrada, utilizan los estados oceánicos y atmosféricos obtenidos por los demás modelos a fin de simular ciclones tropicales con un bajo coste computacional.

Si deseamos fortalecer la capacidad de las comunidades costeras e insulares para resistir los ciclones tropicales, es fundamental cuantificar y entender la variabilidad tanto en su incidencia como en algunas de sus características; entre ellas, su velocidad de avance y su relación con la cantidad total de lluvias. El trabajo de Kossin allana el camino en esa dirección, al tiempo que plantea cuestiones que pueden abordarse combinando observaciones y modelos para equilibrar las ventajas y las limitaciones de cada método.

Christina M. Patricola *investiga en la Sección de Ciencias Climáticas y de Ecosistemas del Laboratorio Nacional Lawrence Berkeley, en California.*

Artículo original publicado en *Nature* vol. 558, págs. 36-37, 2018.
Traducido con el permiso de Nature Research Group © 2018

Con la colaboración de nature

PARA SABER MÁS

Can we detect trends in extreme tropical cyclones? Cristopher W. Landsea et al. en *Science*, vol. 313, págs. 452-454, julio de 2006.
Tropical cyclones and climate change. Kevin J. E. Walsh et al. en *WIREs Climate Change*, vol. 7, págs. 65-89, febrero de 2016.
A global slowdown of tropical-cyclone translation speed. James P. Kossin en *Nature*, vol. 558, págs. 104-107, junio de 2018.

EN NUESTRO ARCHIVO

Océanos más cálidos y huracanes más fuertes. Kevin E. Trenberth en *IyC*, septiembre de 2007.
Tras las huellas de El Niño. Emily Becker en *IyC*, diciembre de 2016.

ASTRONOMÍA

Un nuevo método de validación estelar

Una avalancha de datos está a punto de revolucionar la astronomía, pero hasta ahora no existían métodos fiables para validarlos. El telescopio espacial Hubble acaba de ofrecer una solución

RACHAEL BEATON

Intente este experimento: extienda el brazo con el pulgar levantado y guiñe primero un ojo y luego el otro. Al cambiar de ojo, parecerá que su pulgar «salta» entre dos posiciones. Dicho salto se conoce como paralaje, y permite calcular la distancia a la que se encuentra su pulgar usando trigonometría.

En astronomía, la paralaje se emplea para medir distancias a escalas mucho mayores. En un trabajo publicado hace poco en *The Astrophysical Journal Letters*, Thomas M. Brown, del Instituto para la Ciencia del Telescopio Espacial, en Maryland, y sus colaboradores han logrado efectuar este tipo de medición para el cúmulo estelar cercano NGC 6397 con ayuda del telescopio espacial Hubble. Su técnica proporcionará un método clave para validar la enorme cantidad de datos publicados este año por la misión Gaia, de la Agencia Espacial Europea.

Resulta casi imposible encontrar un área de la astronomía que no dependa de la escala de distancias cósmicas: un conjunto de métodos que, aplicados en serie, permiten determinar aquellas distancias que resultan demasiado grandes para poder medirlas directamente. Dichas distancias se usan como factores de conversión para derivar las propiedades físicas de los objetos celestes a partir de las observaciones y, por tanto, resultan esenciales para construir modelos del universo.

La base de la escala de distancias cósmicas son las paralajes trigonométricas de estrellas individuales. Esas paralajes permiten calibrar las propiedades físicas de dichas estrellas, las cuales pueden usarse luego para inferir las características de estrellas, cúmulos estelares y galaxias cada vez más lejanos. A las mayores escalas, sirven incluso para calcular el tamaño del universo observable.

CÚMULO ESTELAR NGC 6397: Una determinación reciente de la distancia a la que se encuentran las estrellas de este cúmulo cercano permitirá validar la enorme cantidad de datos obtenidos por la misión Gaia, de la Agencia Espacial Europea.

NASA/ESA/TELESCOPIO ESPACIAL HUBBLE/AURA/STSCI

Explosión de datos

En 1838, Friedrich Bessel fue el primero en medir una paralaje estelar. Desde entonces se han obtenido muchas más: hasta principios de este año, se habían realizado unos dos millones. Pero, aunque esa cifra parezca elevada, en realidad solo abarcaba el callejón sin salida astronómico en el que reside el Sol. El mismo número aumentó a unos 1000 millones en abril, después de que la misión Gaia hiciera públicos sus resultados, concernientes a una región que se extiende mucho más allá del sistema solar y que llega hasta el centro de la galaxia.

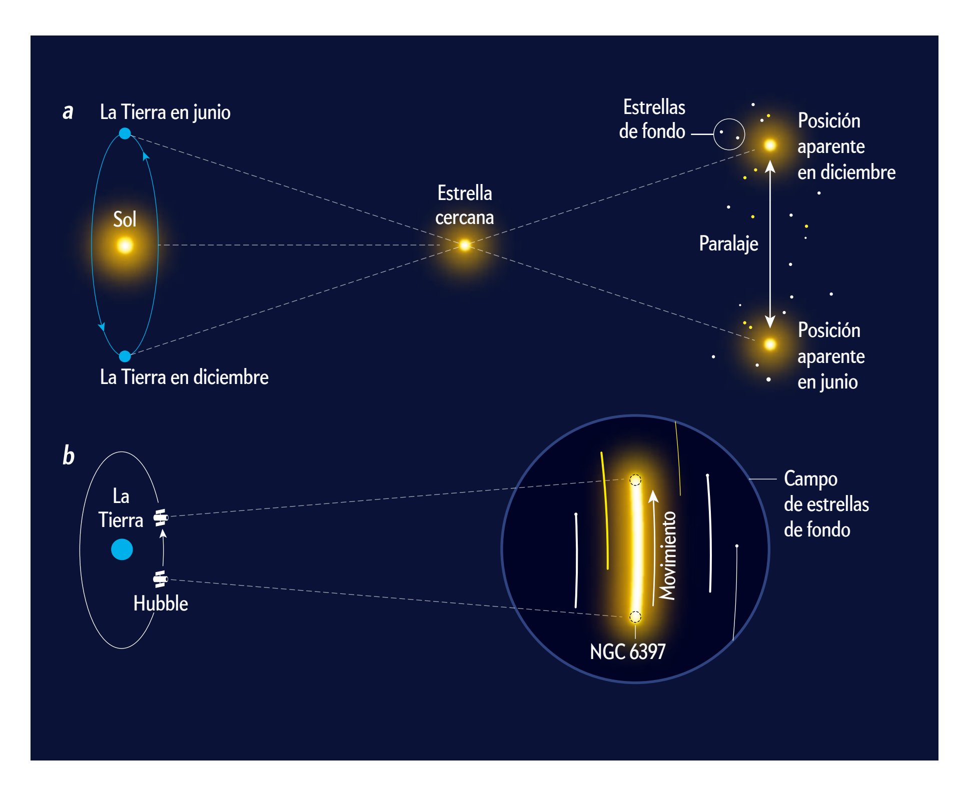
Hasta que se publicaron los datos del equipo de Brown, solo existía una técnica (la interferometría de base muy larga) capaz de medir paralajes de manera directa a esas distancias. Ello constituía un motivo de preocupación, ya que los datos de Gaia serán usados por astrónomos de todo el mundo y, por tanto, era deseable disponer de más de un método directo para medir paralajes estelares y poder validar los datos de la misión.

El procedimiento experimental para medir paralajes estelares es básicamente idéntico al descrito con el dedo pulgar. Primero, se toman dos imágenes del mismo objeto astronómico separadas por un intervalo de seis meses. Ello asegura que se obtienen desde posiciones que distan lo mismo que el diámetro de la órbita de la Tierra alrededor del Sol. En segundo lugar, se determina el desplazamiento aparente de la estrella investigada. Eso conlleva medir la posición de la estrella en cada imagen con gran precisión y, acto seguido, medir su posición con respecto a un conjunto de objetos de referencia (estrellas o galaxias) de la misma imagen. Ambas tareas son conceptualmente sencillas, pero difíciles de llevar a la práctica. En su trabajo, Brown y sus colaboradores las han abordado de manera muy interesante.

Escaneo espacial

Para medir la posición del cúmulo estelar en cuestión, los investigadores tomaron las dos imágenes con una cámara del telescopio Hubble e hicieron una exposición prolongada, de modo que las estrellas del cúmulo «se moviesen» a través de las fotografías como consecuencia del desplazamiento del instrumento alrededor de la

PARALAJE Y DISTANCIA: Un mismo objeto visto a lo largo de dos líneas de visión mostrará posiciones aparentes distintas, un efecto conocido como paralaje. Ello permite determinar la distancia a una estrella cercana midiendo su posición con seis meses de diferencia (*a*). Un trabajo reciente ha estimado la distancia al cúmulo estelar cercano NGC 6397 (*b*). Para ello, el telescopio Hubble tomó fotografías de larga exposición en las que el cúmulo aparecía como una franja debido al desplazamiento del telescopio alrededor de la Tierra (*el movimiento aparente del cúmulo se muestra exagerado*). Cada punto a lo largo de la franja proporciona una medida diferente de la posición de cada estrella del cúmulo, lo que ha permitido medir sus posiciones aparentes con mayor precisión que a partir de imágenes «instantáneas».



Tierra. Esta técnica, conocida como «escaneo espacial» (*spatial scanning*), hace que las imágenes del objeto adopten la forma de franjas alargadas. Cada punto a lo largo de la franja proporciona una medida diferente de la posición de cada estrella del cúmulo.

Las imágenes de NGC 6397 tomadas por el equipo de Brown comprenden más de 1000 mediciones individuales, lo que hace que la precisión global aumente más de 30 veces con respecto a la de una «instantánea» convencional. Además, cada medida se efectuó para numerosas estrellas del cúmulo. Algunos investigadores del mismo grupo habían usado anteriormente el escaneo espacial para estudiar estrellas individuales excepcionalmente brillantes y situadas a varios miles de años luz. Sin embargo, Brown y sus colaboradores son los primeros que han aplicado esta técnica a las estrellas tenues de un cúmulo situado a tales distancias (NGC 6397 se encuentra a unos 7800 años luz de la Tierra).

A continuación, los autores usaron la misma técnica para medir con gran precisión la posición de otras estrellas que no pertenecían al cúmulo, sino al fondo de estrellas más distantes. Ello les permitió determinar el desplazamiento de las estrellas del cúmulo con respecto a cada una de las del fondo. Con todo, es necesario poner esas paralajes relativas en un sistema de referencia absoluto, y definir tal sistema no es sencillo. Para conseguirlo, Brown y sus colaboradores necesitaron cálculos aproximados de las paralajes de las estrellas no pertenecientes al cúmulo. Los autores los obtuvieron determinando el tipo y el tamaño de cada estrella y asignándoles las propiedades físicas medias de su clase, a partir de las cuales es posible determinar su distancia y, por tanto, su paralaje.

También la misión Gaia emplea una técnica de escaneo para obtener las posiciones de los objetos de interés, pero establece el sistema de referencia absoluto a partir de una muestra de cuásares (galaxias situadas a enormes distancias) distribuidos a lo largo todo el cielo. El sistema de referencia del equipo de Brown tiene incertidumbres sistemáticas distintas a las de Gaia, por lo que podría proporcionar una manera directa e independiente de poner a prueba el de Gaia si se ampliara para incluir más cúmulos estelares.

Las mediciones de alta precisión de paralajes a grandes distancias proporcionadas por Gaia representan un gran avance para la astronomía. Pero, como en todos los campos de la ciencia, la precisión no es la única fuente de incertidumbre. También resulta crucial entender las incertidumbres sistemáticas asociadas al sistema de referencia. Las incertidumbres sistemáticas solo pueden reducirse añadiendo información nueva e independiente, como la proporcionada por Brown y sus colaboradores. Los trabajos dedicados a establecer estas garantías pueden resultar tediosos y a menudo pasan inadvertidos, pero constituyen la base del progreso científico.

Rachael Beaton *es astrofísica de la Universidad de Princeton.*

Artículo original publicado en *Nature* vol. 558, págs. 33-35, 2018. Traducido con el permiso de Nature Research Group © 2018

Con la colaboración de nature

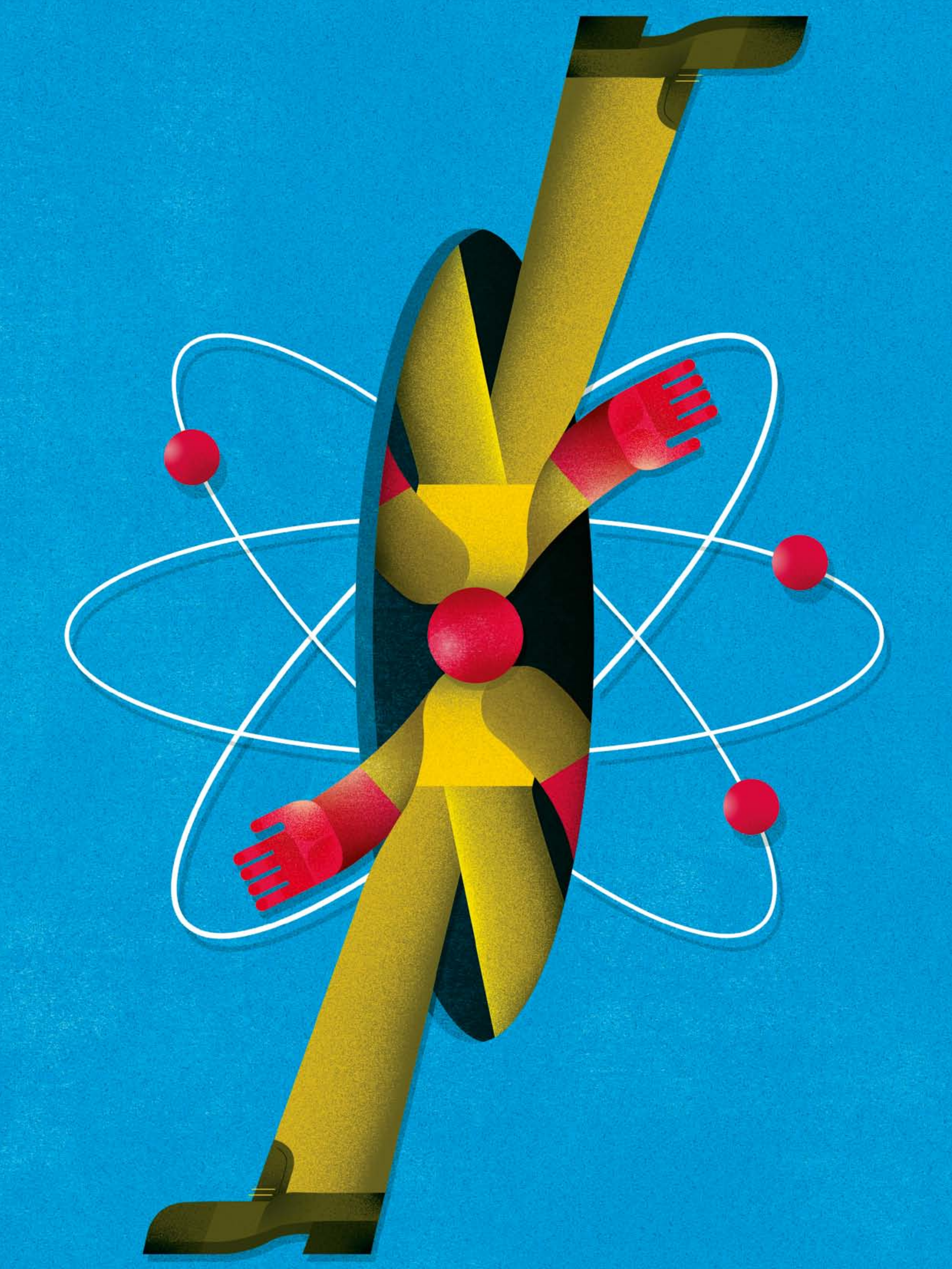
PARA SABER MÁS

A high-precision trigonometric parallax to an ancient metal-poor globular cluster. Thomas M. Brown et al en *The Astrophysical Journal Letters*, vol. 856, art. L6, marzo de 2018.

Gaia data release 2: Summary of the contents and survey properties. Colaboración Gaia en *Astronomy & Astrophysics*. Publicado en línea en abril de 2018: **doi.org/10.1051/0004-6361/201833051**

EN NUESTRO ARCHIVO

La misión Gaia y la historia de nuestra galaxia. Carme Jordi y Eduard Masana en *IyC*, abril de 2017.



FÍSICA

CRUZAR LA FRONTERA CUÁNTICA

La mecánica cuántica describe un universo extraño y probabilístico que no parece corresponderse con nuestra realidad macroscópica. Nuevos experimentos investigan dónde —y por qué— se pasa de un dominio al otro

Tim Folger

Ilustración: Maria Corte

Tim Folger es periodista científico. Escribe para *National Geographic*, *Discover* y otras publicaciones y es editor de la serie *The best American science and nature writing*.



La mayoría de las creaciones de Simon Gröblacher son invisibles al ojo humano. Uno de sus dispositivos mecánicos, fabricado en su laboratorio de la Universidad Técnica de Delft, apenas mide unas millonésimas de metro de largo (no mucho más que una bacteria) y 250 nanómetros de ancho (unas mil veces más delgado que una hoja de papel). Gröblacher podría encoger aún más sus diseños, pero su objetivo es justamente el contrario: aumentar su tamaño. «Lo que estamos tratando de hacer es fabricar cosas muy, muy grandes», explica. Para Gröblacher, «muy, muy grande» significa algo que pueda verse sin la ayuda de un microscopio, «con un tamaño de un milímetro por un milímetro».

Al llegar a esa escala tan «descomunal», Gröblacher espera abordar una pregunta extraordinaria: ¿puede un objeto macroscópico encontrarse en dos lugares a la vez? ¿Podría algo del tamaño de, pongamos, una cabeza de alfiler existir aquí y allá al mismo tiempo? Esa situación aparentemente imposible constituye la norma para átomos, fotones y demás partículas microscópicas. De acuerdo con las extrañas leyes de la mecánica cuántica, la realidad desafía nuestras suposiciones lógicas. Las partículas no tienen posiciones, energías ni otras propiedades bien definidas... por lo menos mientras nadie las mire. Antes bien, pueden existir en varios estados de manera simultánea.

Sin embargo, por alguna razón que los físicos no acaban de entender, la realidad que percibimos con nuestros sentidos es muy diferente. Nuestro mundo macroscópico parece ser claramente *no* cuántico. Los objetos de gran tamaño (cualquier cosa con las dimensiones de un virus o mayor) siempre se manifiestan en un solo lugar: hay un único Gröblacher en su laboratorio de Delft hablando con un único periodista. Y eso encierra un misterio: si todo se basa en un borrón cuántico de materia y energía, ¿por qué no experimentamos esa rareza? ¿Dónde termina el mundo cuántico y dónde comienza el universo clásico de la física newtoniana? ¿Existe una división en la realidad, una escala a partir de la cual los efectos cuánticos simplemente dejan de existir? ¿O la mecánica cuántica gobierna todo, pero, por algún motivo, no somos capaces de verlo?

«Sabemos que el micromundo es cuántico, y sabemos, de un modo u otro, que nosotros somos clásicos, signifique eso lo que signifique», afirma Angelo Bassi, físico teórico de la Universidad de Trieste. «Ignoramos la verdadera naturaleza de la materia entre lo micro y lo macro.» Esa tierra de nadie ha desconcertado a los físicos desde el nacimiento de la teoría cuántica, hace ya un siglo. Pero, en los últimos años, Gröblacher y otros investigadores han comenzado a llevar a cabo pequeños experimentos que, con una sensibilidad exquisita, podrían revelar cómo tiene lugar esa transición de lo cuántico a lo cotidiano. Nadie sabe todavía si esos esfuerzos resolverán los misterios de la teoría cuántica o los aumentarán. Pero, al explorar los indómitos aledaños de la frontera cuántica, los físicos tendrán la oportunidad de descubrir un nuevo dominio de la realidad.

EL PROBLEMA DE LA MEDIDA

A pesar de todas sus paradojas, la mecánica cuántica es la teoría científica más potente jamás formulada. Sus predicciones coinciden con los resultados experimentales con una precisión insólita, superior en algunos casos a una parte entre un billón. Al revolucionar nuestra comprensión de la estructura atómica, la teoría cuántica transformó todos los aspectos de la ciencia, desde la biología hasta la astrofísica. Sin ella, no habría industria electrónica, ni teléfonos móviles, ni Google. Sin embargo, para Stephen L. Adler, físico teórico del Instituto de Estudios Avan-

EN SÍNTESIS

Los mundos micro- y macroscópico no encajan a la perfección: la naturaleza probabilística de la mecánica cuántica impera en el primero, mientras que el segundo parece observar reglas clásicas y deterministas.

¿Dónde acaba un dominio y comienza el otro? Durante largo tiempo, los físicos han carecido de los medios técnicos para abordar esta pregunta. Ahora, una nueva generación de experimentos intentará responderla.

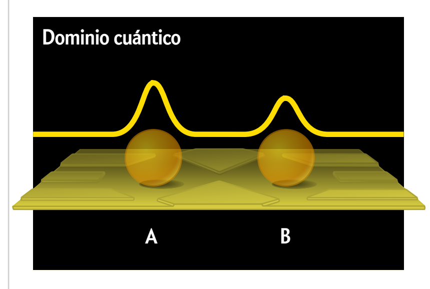
Entre otras posibilidades, varias propuestas han intentado modificar la mecánica cuántica para postular un «colapso objetivo» de la función de onda. De ser cierto, dicho fenómeno físico podría tener efectos medibles.

Dominios separados

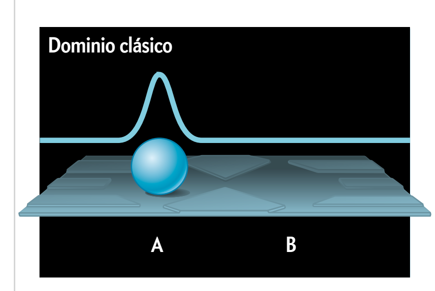
La mecánica cuántica predice todo tipo de efectos extraños en el mundo microscópico que, sin embargo, no observamos en nuestra realidad macroscópica. ¿A qué se debe? Al respecto, varias propuestas han intentado explicar cómo se produce esa transición de un dominio a otro.

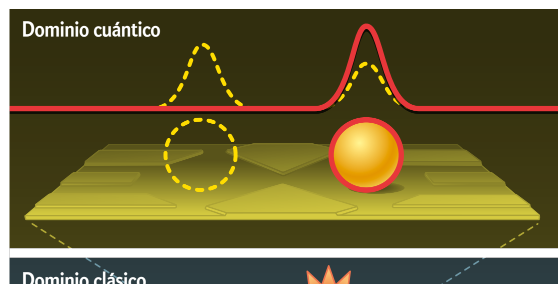
Cuántico frente a clásico

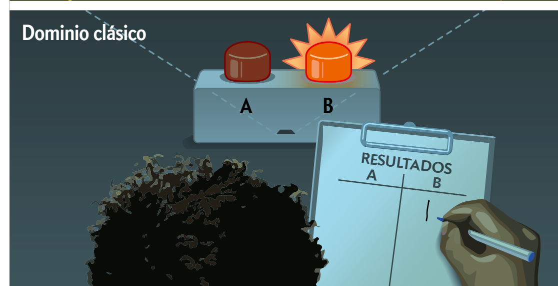
Según la mecánica cuántica, las partículas no existen en estados definidos, sino que pueden adoptar múltiples estados a la vez. Las ecuaciones de la teoría describen las partículas mediante funciones de onda, las cuales corresponden a superposiciones de varios estados. En este ejemplo, la amplitud de la onda en cada pico determina la probabilidad de encontrar la partícula en A o en B.



Al medir la posición de la partícula, todas las posibilidades cuánticas se reducen a una, elegida aparentemente al azar. Si, por ejemplo, el experimento encuentra la partícula en A, esta entrará en el dominio clásico y dejará de estar descrita por una superposición.

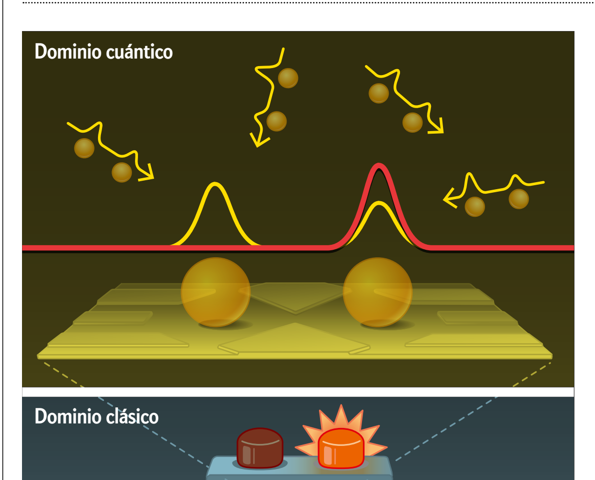






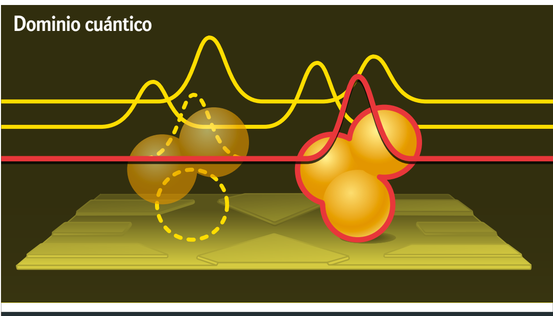
Colapso al medir

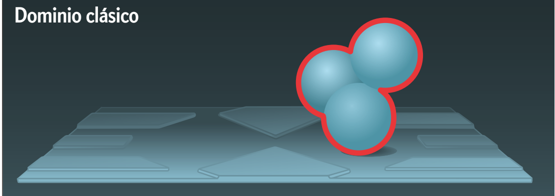
Una propuesta sostiene que el paso de lo cuántico a lo clásico se debe al acto de medir. Una partícula puede permanecer en un estado de superposición cuántica (*líneas amarillas punteadas*) siempre que no la observemos. Pero, una vez que se produzca la medida, la partícula se verá forzada a «elegir» un estado concreto (*líneas rojas*). Cómo sucede esto y por qué una medición humana debería tener tanta importancia en la física son preguntas que continúan desconcertando a los científicos.



Decoherencia

Otra teoría postula que la transición al mundo clásico está causada por la interacción de la partícula con el entorno. Una partícula puede permanecer en un estado de superposición mientras no se vea perturbada por ninguna influencia externa. No obstante, cuando las funciones de onda de otras partículas u objetos cercanos se mezclan con la suya, interfieren de tal modo que hacen que las múltiples posibilidades cuánticas colapsen en una única realidad clásica.





Localización espontánea continua

Por último, otra posibilidad defiende que el colapso de la función de onda es un suceso aleatorio que no depende de influencias humanas o ambientales. La probabilidad de colapso es extremadamente pequeña para una partícula individual. Pero, en un objeto macroscópico formado por innumerables partículas, es inevitable que el colapso se produzca en al menos una de ellas, lo que acaba afectando a toda la estructura.

JEN CHRISTIANSEN

zados de Princeton, la teoría adolece de un defecto flagrante: «En la mecánica cuántica, las cosas no ocurren».

El críptico comentario de Adler se refiere a lo que dicen, o a lo que no dicen, las ecuaciones fundamentales de la teoría. Por medio de un objeto matemático llamado función de onda, dichas ecuaciones asignan probabilidades a las diferentes opciones de encontrar un objeto en un estado o en otro. A diferencia de lo que ocurre en física newtoniana, donde las manzanas y los planetas tienen siempre propiedades bien definidas, la física cuántica es intrínsecamente probabilística. En cierto sentido, ni siquiera podemos decir que las partículas descritas por las funciones de onda existan por completo, ya que no tienen posiciones, velocidades o energías fijas, solo probabilidades. Sin embargo, todo eso cambia cuando tiene lugar una medición. En ese momento aparecen las propiedades reales y tangibles, como si las hiciésemos emerger por el mero hecho de observarlas. Pero la teoría no solo no dice por qué las mediciones producen esta transformación, sino que tampoco explica por qué se manifiesta una de esas múltiples posibilidades en vez de las otras. La teoría describe cuál podría ser el resultado de una medida, pero no cuál será. En otras palabras, no proporciona ningún mecanismo para la transición desde lo probable hacia lo real.

Para «hacer que las cosas ocurran», uno de los fundadores de la teoría cuántica abogó por un truco casi metafísico. A finales de los años veinte del siglo pasado, Werner Heisenberg difundió la idea de que el mismo acto de medir provoca que la función de onda de una partícula «colapse»; es decir, que los múltiples resultados posibles se reduzcan instantáneamente a uno, el único observado. No obstante, el problema de esta propuesta radica en que no hay nada en las ecuaciones de la teoría que implique que debe producirse un colapso, o que proporcione un proceso físico que lo explique. La propuesta de Heisenberg introdujo un nuevo misterio: ¿qué sucede exactamente cuando la función de onda colapsa? Ese enigma se conoce hoy como «problema de la medida».

Puede que, a lo largo de los últimos 90 años, los físicos se hayan acostumbrado a la noción de colapso, pero nunca les ha acabado de gustar. La idea de que una acción humana —medir— desempeñe un papel central en la teoría más fundamental de la física no resulta fácil de aceptar para quienes defienden el concepto de una realidad objetiva.

«A nivel fundamental, tengo un ideal de cómo debería ser una teoría física», señala Steven Weinberg, físico de la Universidad de Texas en Austin y receptor del premio Nobel en 1979. «Debería ser algo que no hiciese referencia al ser humano de ninguna manera concreta. Algo a partir de lo cual pudiera derivarse todo lo demás, incluido lo que podamos decir de manera sistemática sobre química, biología o cuestiones humanas. No debería presentar al ser humano desde el principio en las leyes de la naturaleza. Y, sin embargo, no veo ninguna manera de formular la mecánica cuántica sin un postulado interpretativo sobre lo que sucede cuando alguien decide medir una cosa u otra.»

> **«No nos enfrentamos a ninguna crisis. La mecánica cuántica no está en conflicto con ninguna observación. Simplemente, no se ajusta a los prejuicios filosóficos reaccionarios de personas como yo»**
>
> ***—Steven Weinberg, premio nóbel de física 1979***

ELIJA SU INTERPRETACIÓN

Una manera de resolver el problema de la medida consiste en suponer que el colapso no tiene lugar. A principios de los años setenta, H. Dieter Zeh, hoy profesor emérito de la Universidad de Heidelberg, propuso un proceso que, aunque mantiene la apariencia de colapso, preserva por completo la multiplicidad de la función de onda. En el mundo real, la función de onda de cualquier objeto acabará irremediablemente entremezclada con la de todo lo demás que haya en el entorno. Ello hace que, en la práctica, resulte imposible llevar la cuenta de las innumerables interacciones cuánticas que se producen a nuestro alrededor. En jerga cuántica se dice que las funciones de onda están «entrelazadas». Eso significa que presentan un tipo especial de correlación que hace que dos sistemas sigan estando conectados incluso cuando se encuentran separados por vastas distancias. Un observador no puede aspirar a ver más que una pequeña parte de ese descomunal sistema entrelazado, por lo que cualquier medición solo podrá reflejar una esquirla del mundo cuántico.

Dicho proceso, al que Zeh llamó «decoherencia», se ha convertido en la opción preferida entre los físicos para explicar por qué no presenciamos fenómenos cuánticos a nivel macroscópico. Describe cómo una función de onda intacta (que incluye todos los posibles estados físicos que podría adoptar una partícula) pierde la coherencia cuántica a medida que se mezcla con las funciones de onda de otros sistemas del entorno. Si la decoherencia es correcta, nosotros mismos viviríamos entre los hilos de esa red cuántica entrelazada, pero solo veríamos una parte de ella.

Sin embargo, no todos los físicos creen que la decoherencia solucione el problema de la medida. Para empezar, sigue sin explicar por qué vemos un hilo de la red cuántica y no otros. «Aún hemos de invocar el postulado del colapso, el cual toma un estado entrelazado y dicta que hay que seleccionar uno de los estados posibles. Y eso generalmente se hace por decreto», objeta Miles P. Blencowe, físico teórico del Dartmouth College, en Nuevo Hampshire. Para Blencowe y otros, el proceso no refleja la manera en que experimentamos las cosas. «Creo que tenemos un solo mundo que evoluciona», señala. «¿Cómo pasamos de un estado entrelazado a la percepción de un mundo en el que siempre encontramos un único camino hacia el futuro? Muchos piensan que es necesario un colapso para restituir esa unicidad en la evolución del mundo, en lugar de obtener una red de entrelazamientos que no para de crecer.» Adler, por su parte,

se muestra más vehemente sobre la decoherencia: «No proporciona ningún mecanismo [de colapso] en absoluto. No resuelve el problema, punto».

Hace seis decenios, un estudiante de doctorado de la Universidad de Princeton propuso una solución aún más radical para el problema del colapso. En su tesis doctoral de 1957, Hugh Everett postuló que la función de onda ni colapsa ni pierde la coherencia cuántica. En su lugar, todas sus componentes serían reales, y formarían parte de una panoplia de universos que se bifurca indefinidamente. La llamada interpretación de los «muchos mundos» de Everett se ha vuelto popular entre algunos cosmólogos, quienes cuentan con otras razones para pensar que podríamos habitar en un multiverso [*véase* «El multiverso cuántico» por Yasunori Nomura; Investigación y Ciencia, agosto de 2017]. No obstante, nadie ha logrado nunca distinguir experimentalmente la idea de los muchos mundos de la teoría cuántica estándar.

Lo mismo sucede con otras interpretaciones de la mecánica cuántica. Louis de Broglie, uno de los fundadores de la teoría, trató de eliminar la necesidad del colapso introduciendo la idea de las «ondas piloto», las cuales guiarían las trayectorias de las partículas. En la versión de De Broglie, que en los años cincuenta desarrollaría David Bohm, no se produce ningún colapso misterioso: las mediciones simplemente muestran la interacción de las ondas piloto y sus partículas asociadas. Pero, de nuevo, nadie ha hallado pruebas experimentales que distingan entre las ondas piloto de De Broglie y Bohm de los muchos mundos de Everett o de cualquier otra interpretación de la mecánica cuántica. Al final, cada físico elige su descripción favorita de la realidad por razones estéticas. «Vuelvo de nuevo al hecho de que tenemos un solo mundo que evoluciona», insiste Blencowe. «Para ello, necesitamos un colapso que no sea solo una regla para explicar los resultados de los experimentos, sino un proceso real.»

PONER A PRUEBA EL COLAPSO

En la ciudad de Delft, para llegar al laboratorio de Gröblacher desde el casco antiguo hay que recorrer unos dos kilómetros hacia el sur y lo que parecen varios cientos de años hacia el futuro. En una cálida mañana de primavera, el científico muestra uno de los objetos «muy, muy grandes» construidos por su equipo: una membrana de tamaño milimétrico atada a un chip de silicio apenas visible.

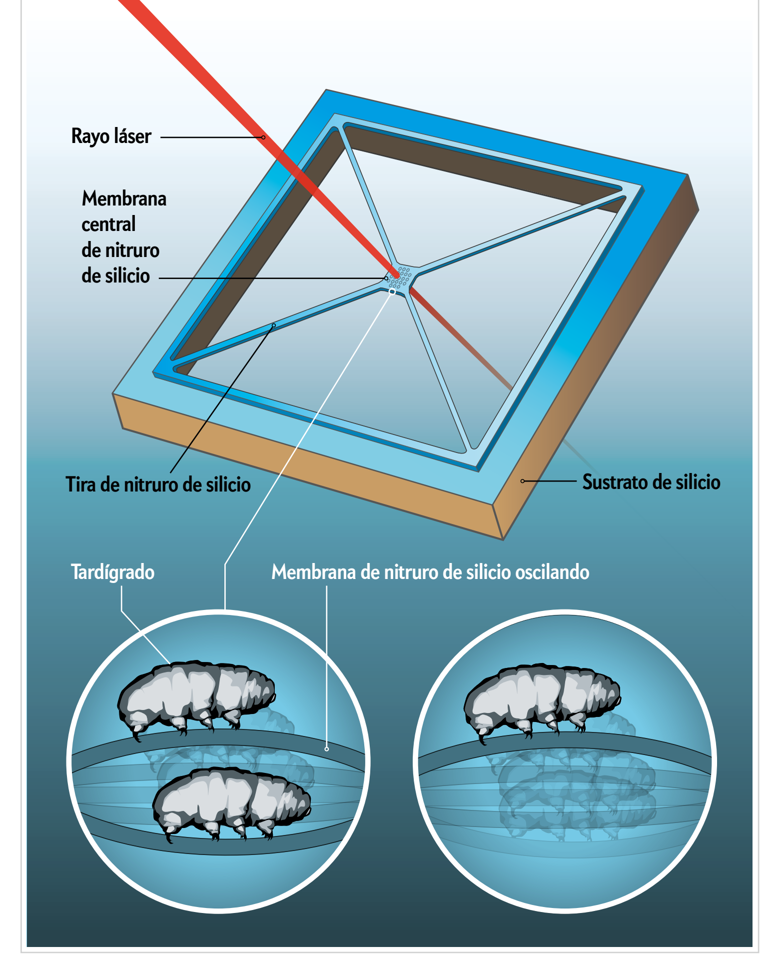
De cerca, la membrana recuerda a una diminuta cama elástica. Se compone de nitruro de silicio, un material cerámico usado en los cojinetes de los motores de los transbordadores espaciales, y posee un espejo muy reflectante en su centro. Una sola sacudida puede hacer que la membrana vibre durante minutos: «Para hacernos una idea, sería como empujar a alguien en un columpio y que, con un solo impulso, se balanceara durante diez años», explica Gröblacher. A pesar de su diminuto tamaño, es muy resistente. «Aplicamos muchísima presión sobre ella: seis gigapascales», aclara Richard Norte, uno de los colaboradores de Gröblacher. «Eso equivale a unas 10.000 veces la presión que soporta el neumático de una bicicleta, sobre algo que apenas es unas ocho veces más grueso que el ADN.»

Esa resistencia convierte a la membrana en un sistema ideal para estudiar fenómenos cuánticos, ya que vibra sin romperse a temperatura ambiente. En un futuro, Gröblacher y Norte planean usar un láser para llevar la membrana a un estado de superposición: uno en el que el objeto se encontraría oscilando con dos amplitudes diferentes al mismo tiempo. El hecho de que pueda vibrar de manera continuada durante varios minutos debería, en principio, permitir que esos estados cuánticos perduren el tiempo suficiente para ver qué ocurre cuando el objeto colapse —si es que lo hace— a un único estado clásico.

EXPERIMENTOS

Sondear la frontera

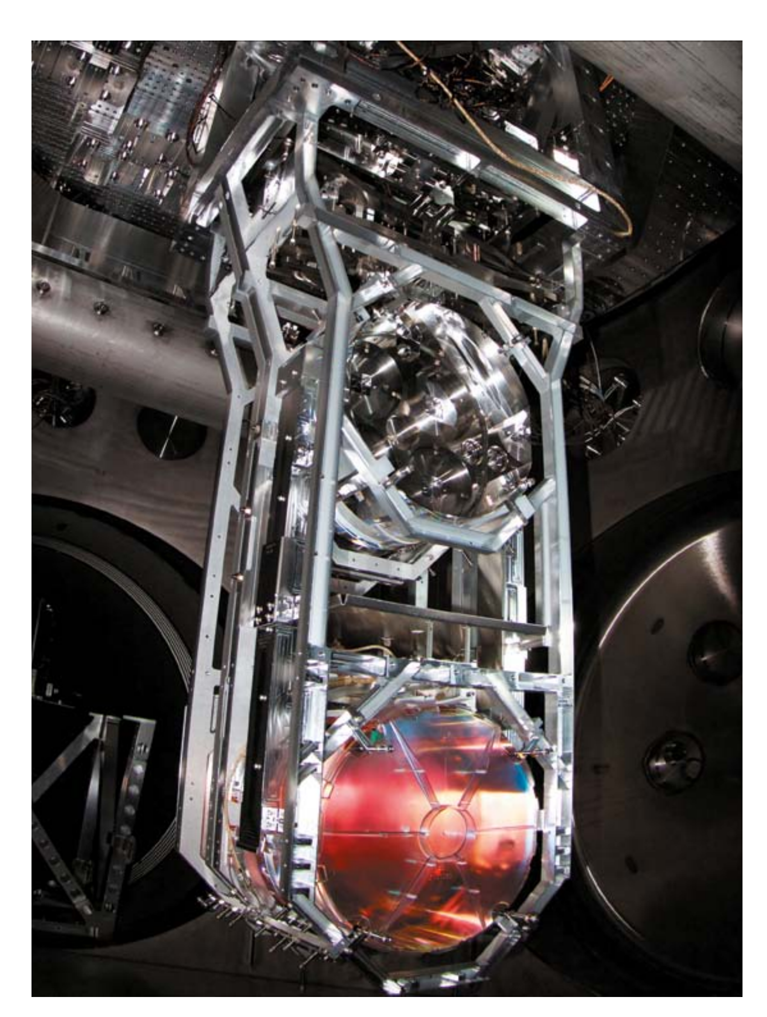
Hace tiempo que los físicos intentan comprobar si los objetos macroscópicos pueden exhibir comportamientos cuánticos. A tal fin, un experimento previsto contará con una membrana de tamaño milimétrico similar a una diminuta cama elástica. En la membrana, unida a un chip de silicio, podrán inducirse vibraciones de larga duración. Los científicos usarán un láser para llevar la membrana a un estado de superposición cuántica, de modo que oscile con dos amplitudes diferentes. Con ello esperan ver qué ocurre cuando el sistema colapse a un único estado. En el futuro, las pruebas podrían incorporar un ser vivo: un pequeño organismo de medio milímetro de longitud llamado tardígrado.



JEN CHRISTIANSEN

«Eso es justo lo que necesitamos para obtener algo cuántico», continúa Gröblacher. «No queremos que interaccione con el entorno porque, supuestamente, eso induce la decoherencia. Así que buscamos un sistema muy aislado para ponerlo en un estado cuántico y activar nuestra propia decoherencia, provocada por algo que podamos controlar, como un láser. Aún no hemos alcanzado el punto en el que podemos crear una superposición de las oscilaciones, pero esperamos conseguirlo en unos años.»

Gröblacher y sus colaboradores no piensan detenerse ahí. En última instancia, esperan colocar un animal vivo sobre la membrana y llevarlo también a un estado de superposición cuántica. Los principales candidatos para tomar parte en esta misión al espacio cuántico son los tardígrados, pequeños organismos de ocho patas también conocidos como osos de agua. «Son unas criaturas asombrosas», apunta Gröblacher. «Los enfrías y siguen vivos; los calientas y siguen vivos; los colocas en el vacío y siguen vivos.» No obstante, el investigador admite que este paso aún queda lejos: «No es una locura, es un buen objetivo a largo plazo. Pero primero tenemos que llevar nuestros dispositivos a un estado de superposición; entonces podremos pensar en introducir un ser vivo».



LOS ESPEJOS DE LIGO (*imagen*) no han hallado pruebas de la validez de ciertos modelos que describen un «colapso objetivo» de la función de onda.

COLABORACIÓN LIGO, INSTITUTO DE TECNOLOGÍA DE CALIFORNIA E INSTITUTO DE TECNOLOGÍA DE MASSACHUSETTS

LOCALIZACIÓN ESPONTÁNEA CONTINUA

Con o sin tardígrados, un experimento así permitiría investigar si la naturaleza censura o no los efectos cuánticos a partir de cierta escala. Al respecto, algunos físicos han propuesto que el colapso podría ser un fenómeno físico real, u «objetivo», con efectos medibles. Una idea, conocida como «localización espontánea continua» (LEC), postula que el colapso de la función de onda no es más que un suceso aleatorio que ocurre constantemente en el mundo microscópico. Según esta teoría, la probabilidad de que una partícula cualquiera colapse es minúscula: algo que podría ocurrir una vez cada varios cientos de millones de años. Sin embargo, para grandes agregados de partículas, el colapso se torna una certeza.

«Un protón tendría que esperar unos 10^{16} segundos para experimentar un colapso, por lo que algo así solo ocurriría unas pocas veces en el tiempo de vida del universo actual», explica Bassi. No obstante, la enorme cantidad de partículas que componen cualquier objeto macroscópico hacen del colapso algo inevitable. «Para una mesa, con un número de partículas cercano al número de Avogadro (10^{24}), el colapso ocurre casi de inmediato.» Si la LEC es real, la medida y la observación no desempeñarían ningún papel. En su lugar, la partícula y los dispositivos que la registran formarían parte de un inmenso conjunto cuántico que colapsaría con gran rapidez. Aunque parezca que, durante la medición, la partícula pasa de un estado de superposición a otro con una posición bien definida, dicha transformación se produce tan pronto como la partícula interacciona con los aparatos; es decir, antes de que la medición tenga lugar.

Si el colapso fuese un fenómeno físico real, las consecuencias prácticas serían importantes. Para empezar, podría haber problemas con los ordenadores cuánticos. «En principio, nos gustaría hacer ordenadores cuánticos cada vez mayores», explica Bassi. «Pero no seríamos capaces de ejecutar algoritmos cuánticos, ya que el colapso daría al traste con todo.» Durante décadas, la mayoría de los físicos han considerado que el colapso era un aspecto básicamente no verificable de la teoría cuántica. Pero eso ha cambiado con la LEC y otros modelos similares. La LEC predice que el colapso imparte una leve sacudida a las partículas, lo que daría lugar a vibraciones detectables en los experimentos. «El colapso [en la LEC] es algo universal para los sistemas micro- y macroscópicos», explica Bassi. «Cada vez que se produce, la partícula se mueve un poco.»

Bassi y otros físicos han buscado pruebas de ello en los datos del Observatorio de Ondas Gravitacionales por Interferometría Láser (LIGO). En febrero de 2016, LIGO anunció la primera detección de una onda gravitacional. Dicha onda, una perturbación del espaciotiempo generada por la colisión de dos agujeros negros distantes, expandió y comprimió el espacio que separaba los espejos de cada uno de los dos interferómetros de LIGO. En concreto, los desplazó una distancia del orden de la milésima parte del diámetro de un protón. Sin embargo, Bassi y sus colaboradores no hallaron pruebas de ningún movimiento adicional causado por el tipo de empujones cuánticos predichos por la LEC. El resultado no les sorprendió. Si el colapso cuántico constituye un fenómeno físico real, ha de ser extraordinariamente débil. La pregunta era cuánto. Ahora, los investigadores han logrado imponer límites muy precisos a la magnitud del efecto.

También se han buscado signos de colapso en los experimentos diseñados para detectar materia oscura, las hipotéticas partículas que podrían dar cuenta de hasta el 85 por ciento de la masa del universo. El Laboratorio Subterráneo de Canfranc, bajo los Pirineos, usa detectores de germanio que, al ser atravesados por las partículas de materia oscura, podrían generar destellos de rayos X. El colapso de una función de onda también debería producir emisiones, pero por ahora los investigadores no las han observado.

Estos experimentos han acotado de manera considerable los posibles efectos de los modelos de colapso, pero no los han descartado de manera definitiva. El pasado mes de septiembre, Andrea Vinante, de la Universidad de Southampton, anunció junto a Bassi y otros tres investigadores la obtención de indicios preliminares que respaldaban el modelo de LEC. Para ello, su grupo construyó un voladizo en miniatura (una barra horizontal fija en un extremo), de tan solo medio milímetro de largo y dos micras de grosor, con un pequeño imán en la punta. Los investigadores protegieron el conjunto de toda vibración externa y enfriaron el voladizo hasta una temperatura de 40 milésimas de kelvin, a fin de reducir al máximo los movimientos de origen térmico.

En tales condiciones, el voladizo debería haber vibrado muy levemente debido a la agitación térmica de sus partículas; sin embargo, la oscilación real resultó ser mayor. El aparato detector (un instrumento muy sensible conocido como dispositivo superconductor de interferencia cuántica, o SQUID) midió que el voladizo y el imán vibraban como un trampolín, doblándose hacia arriba y hacia abajo con un desplazamiento de unas billonésimas de metro. Hace once años, Adler calculó que el colapso de la función de onda podría generar vibraciones de esa magnitud.

«Observamos un ruido para el que no había explicación», comenta Vinante. «Es algo que concuerda con lo que esperaríamos a partir de los modelos de colapso, pero también podría deberse a otro efecto que no entendemos por completo.» Ahora su grupo trabaja para mejorar el experimento y aumentar la sensibilidad en un factor de 10 o incluso de 100. «Deberíamos ser capaces de, o bien confirmar que hay algo anómalo, o bien descartar que lo que observamos tuviera interés.» Vinante señala que podrían tardar otro año o dos en disponer de nuevos datos. Teniendo en cuenta los éxitos de la teoría cuántica a lo largo del último siglo, las probabilidades de descubrir una desviación son escasas.

Pero ¿y si uno de estos experimentos confirmase el fenómeno del colapso cuántico? ¿Acabaría eso con los misterios y las paradojas de la teoría? «Si realmente existiera el colapso, dividiría el mundo en diferentes escalas», indica Igor Pikovski, físico teórico del Centro Smithsoniano de Astrofísica de Harvard. «Por encima de una determinada escala, la mecánica cuántica dejaría de ser la teoría correcta. Pero, a escalas menores, todo lo que sabemos continuaría siendo válido, por lo que las mismas interpretaciones y preguntas filosóficas que nos atormentan seguirían aplicándose. Aún tendríamos muchos mundos en el caso de los electrones o los átomos, ¡aunque no en el de la Luna! De modo que hay algunos problemas que no resuelve. Creo que hace todo más extraño.»

Los modelos como la LEC constituyen esfuerzos preliminares para unificar esos dos dominios. Aunque aún no son teorías totalmente desarrolladas, con el tiempo podrían ayudar a los físicos a elaborar un modelo de la realidad más completo que el que ofrece la teoría cuántica. «Personalmente, estoy convencido de que necesitamos modificar la mecánica cuántica de alguna manera», dice Adler. «No veo por qué eso tendría que suponer un problema. Durante 200 años se pensó que la mecánica newtoniana era exacta, y no lo es. La mayoría de las teorías tienen un dominio en el que funcionan, pero más allá del cual se necesita una teoría más amplia.»

Pero, al menos por ahora, la mecánica cuántica parece resistir con holgura todas las embestidas. «No, no nos enfrentamos a ninguna crisis. Ese es el problema», observa Weinberg. «En el pasado, siempre hemos avanzado cuando las teorías existentes se encontraban con dificultades. Nada de eso ocurre con la mecánica cuántica. No está en conflicto con ninguna observación. Simplemente, no se ajusta a los prejuicios filosóficos reaccionarios de personas como yo.»

Sin embargo, y a pesar de su extrañeza, la mayoría de los físicos son felices dejando la mecánica cuántica tal y como está. Continúan usándola para hacer funcionar sus aceleradores de partículas y sus detectores de materia oscura, y en muy raras ocasiones se detienen a reflexionar sobre lo que la mecánica cuántica dice o deja de decir sobre la naturaleza fundamental de la realidad. «Pienso que la mayoría adopta una actitud que considero muy razonable», prosigue Weinberg. «Seguir usándola, tratar de seguir extendiendo las fronteras de nuestro conocimiento, y dejar las cuestiones filosóficas para las generaciones futuras.» Sin embargo, muchos no están dispuestos a esperar tanto. «Algunos dirán que la mecánica cuántica nos ha enseñado que el mundo es extraño y que hemos de aceptarlo», concluye Bassi. «Yo diría que no. Si algo es extraño, lo que tenemos que hacer es entenderlo mejor.» IyC

PARA SABER MÁS

Mechanical resonators for quantum optomechanics experiments at room temperature. Richard A. Norte, João Pinto Moura y Simon Gröblacher en *Physical Review Letters*, vol. 116, art. n.º 147202, abril de 2016.

Improved noninterferometric test of collapse models using ultracold cantilevers. Andrea Vinante et al. en *Physical Review Letters*, vol. 119, art. n.º 110401, septiembre de 2017.

EN NUESTRO ARCHIVO

Efectos cuánticos macroscópicos. Markus Aspelmeyer y Markus Arndt en *IyC*, marzo de 2013.

Bayesianismo cuántico. Hans Christian von Baeyer en *IyC*, agosto de 2013.

El problema de la mecánica cuántica. Steven Weinberg en *IyC*, agosto de 2017.

El puzle de la teoría cuántica. Adán Cabello en *IyC*, septiembre de 2017.





EVOLUCIÓN

LA AUTÉNTICA PALEODIETA

El microdesgaste de los dientes fósiles nos señala qué es lo que comían nuestros antepasados y nos proporciona información sobre la forma en que el clima influyó en la evolución humana

Peter S. Ungar

Ilustración de Jon Foster

Peter S. Ungar es paleontólogo de la Universidad de Arkansas. Su investigación se centra en la dieta y las adaptaciones a la alimentación en primates vivos y fósiles, incluidos los antepasados de los humanos. Su libro más reciente se titula *Evolution's Bite* (Princeton University Press, 2017).



Una noche del año 1990 me encontraba en mi tienda de campaña transcribiendo las notas del día, alumbrado por una lámpara de queroseno, en la ribera del río Alas, en el campamento de investigación de Ketambe dentro del Parque Nacional indonesio de Leuser. Había ido a recoger datos para mi tesis doctoral y registrar qué comían ciertos primates y de qué forma lo hacían. La idea era relacionar esas observaciones con el tamaño, la forma y el patrón de desgaste de sus dientes. Los macacos de cola larga tienen incisivos grandes y molares con cúspides romas, una morfología dentaria que la tradición atribuye a la adaptación a una ingesta frugívora. Pero los macacos que había venido observando los últimos cuatro días parecían alimentarse solo de hojas tiernas. Advertí que la relación entre los dientes y su función era más complicada de lo que indicaban los libros, y que el tamaño y la forma de los dientes de los animales no dictan qué es lo que comen. Quizá sonara extraño, pero esa constatación encerraba implicaciones clave para comprender la evolución de los animales, humanos incluidos.

Soy paleontólogo y me gano la vida recreando el comportamiento de especies extintas a partir de sus restos fósiles. Más concretamente, mi trabajo consiste en descubrir de qué modo los animales del pasado obtenían su alimento del entorno y de qué forma los cambios operados en el medio incentivaban la evolución. El año que pasé en Ketambe determinó mi concepción de los primates y la extensa comunidad biológica que los envuelve. Empecé a ver la biosfera, la parte de nuestro planeta que alberga la vida, como un bufé gigante y rico en opciones. Los animales se aproximan hasta el mostrador del bufé con un plato en la mano para escoger entre los alimentos disponibles en un lugar y un momento concretos. Las elecciones que hacen determinan el puesto que ocupa cada especie en el bosque y en el ecosistema.

Los dientes desempeñan un papel importante en la elección de alimento, ya que cada manjar necesita de los utensilios apropiados. Pero en Ketambe aprendí que la disponibilidad de alimento reviste todavía mayor relevancia. Los macacos comían hojas porque eso es lo que la naturaleza ofrecía en su bufé biosférico en aquel momento y en aquel sitio. Su dieta cambiaba a lo largo del año dependiendo del ritmo de florecimiento y maduración de los frutos en el transcurso de las estaciones. Así empecé a recapacitar sobre la incidencia que, en la dieta de las especies, tuvieron las modificaciones experimentadas en la disponibilidad de alimentos a largo de siglos, milenios o más.

La mayoría de los paleontólogos no suelen pensar con esta perspectiva sobre la vida en el pasado. Nuestra disciplina lleva a sus espaldas una larga tradición de inferir la función a partir de la forma, dando por sentado que la naturaleza selecciona las mejores herramientas para realizar cada tarea que los organismos emprendan. Sin embargo, si la función determinase la forma, los macacos no comerían hojas. Pero ¿cómo podemos reconocer en el registro fósil el tipo de alimentos seleccionados?

Durante décadas me he dedicado a esa tarea mediante la investigación de los patrones de microdesgaste de dientes fósiles; entre ellos, los de diferentes antepasados de los humanos. Otros estudiosos han buscado pistas sobre la dieta analizando las señales químicas que los alimentos dejan en los dientes fósiles. Estas señales, o «marcadores nutricionales», como me gusta llamarlos, revelan la dieta del pasado y nos dibujan una imagen mucho más completa que la que proporciona la escueta morfología dentaria. Junto a la información del registro paleoambiental, estos hallazgos nos han permitido contrastar algunas de las principales hipótesis sobre el impacto que tuvieron los cambios

EN SÍNTESIS

Tradicionalmente, se daba por cierto en paleontología que la forma y el tamaño de los dientes de un animal determinaba su dieta. Para el autor, la disponibilidad de comida, que cambia estacionalmente y en escalas de tiempo mayores, constituye un factor aún más determinante a la hora de escoger de qué subsistir.

El análisis microscópico del desgaste y las señales químicas recogidas en los dientes fósiles llegan más lejos que la simple observación de la morfología dentaria y permiten saber qué es lo que realmente comían nuestros antepasados.

La combinación de información sobre la dieta y los datos paleoambientales proporciona nuevas ideas sobre la forma en que el clima influyó en la evolución humana.

climáticos en la evolución humana. Los resultados modifican la interpretación tradicional de la razón del éxito de la rama del árbol filogenético humano, éxito que a otras se les negó.

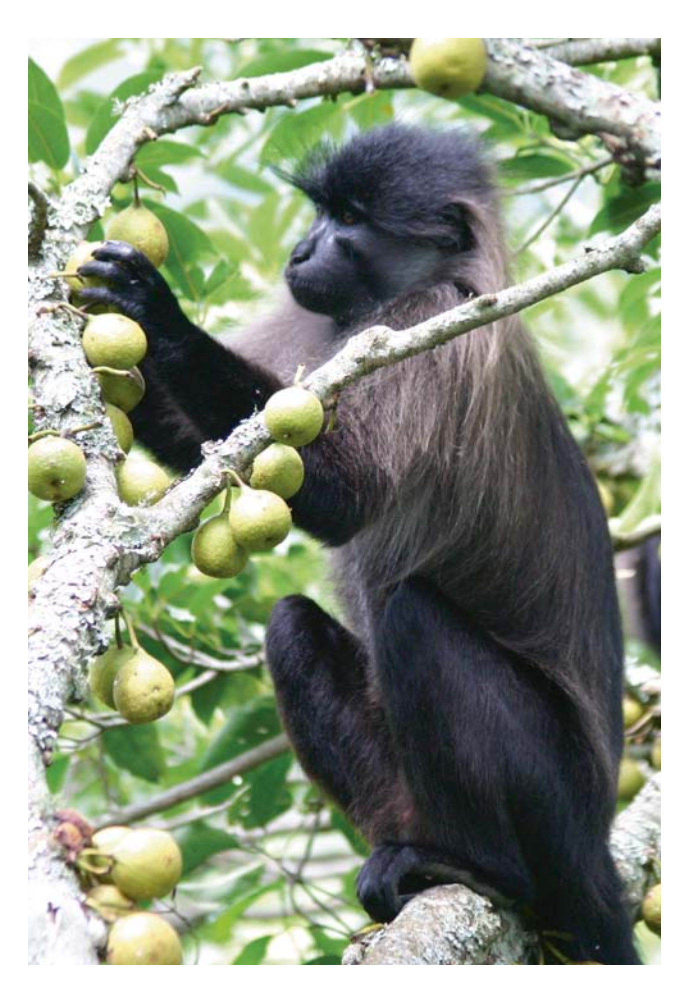
LA PARADOJA DE LIEM

La observación de los seres vivos ha revelado que numerosos organismos no solo consumen alimentos para los que están adaptados. Mientras me encontraba en Ketambe, Melissa Remis, ahora en la Universidad de Purdue, estaba compilando datos sobre la dieta de los gorilas en Bai Hokou, un bosque tropical húmedo en el Parque Nacional Dzanga-Ndoki, en la República Centroafricana. En aquel momento, la mayoría de los investigadores creían que los gorilas tenían una dieta especializada en tallos, hojas y médula de plantas no leñosas, como el apio silvestre. Dian Fossey, pionera en el estudio de los gorilas, y otros investigadores habían demostrado la persistencia de este tipo de dieta en las selvas húmedas que se encuentran a gran altitud en las montañas Virunga, en Uganda y Ruanda. Una afirmación coherente. En efecto, los gorilas poseen dentición y aparato digestivo muy especializados: los molares presentan crestas afiladas para masticar las partes duras de las plantas y unos intestinos de gran longitud donde moran microorganismos que les facultan para digerir la celulosa de alimentos fibrosos. Además, a esas alturas, no disponen de muchas otras cosas que llevarse a la boca.

Sin embargo, los gorilas de las montañas Virunga constituyen una población pequeña y marginal de unos centenares de individuos que viven en un hábitat extremo. Pero ¿qué comen los 200.000 gorilas que viven a 1500 kilómetros al oeste, en las pluviselvas de la cuenca del Congo? Los gorilas de Bai Hokou ofrecían un relato diferente. Parecían preferir frutas blandas y azucaradas. De hecho, Remis observó que los gorilas caminaban un kilómetro o más, dejando de lado hojas y tallos comestibles, hasta llegar a un árbol lleno de frutos. Los alimentos fibrosos parecían dominar su dieta en el caso de que no hubiera las frutas apetecidas. Ahora bien, en comparación con sus parientes de las montañas Virunga, los gorilas de la llanura occidental se mostraron asustadizos, lo que limitaba la cantidad de datos que Remis podía recoger. Apoyándose en la morfología dentaria y en el aparato digestivo, algunos investigadores dudaron de tal preferencia de los gorilas por la fruta.

Ya lo dice el chiste: «¿Con qué alimentas a un gorila de 200 kilos? Con lo que él quiera». ¿Cómo saber qué quiere comer un gorila? Cuando Remis regresó de Bai Hokou, se encaminó hacia al Zoológico de San Francisco para preguntárselo a los propios simios. Ofreció a los ejemplares en cautividad una gran variedad de alimentos, desde mango dulce hasta tamarindo amargo, limón agrio y, por supuesto, apio duro. Los gorilas del zoológico preferían claramente las frutas azucaradas y carnosas a los alimentos duros y fibrosos, con independencia de lo que señalara la forma de sus dientes y su sistema digestivo. Semejante comprobación confirmó que los gorilas, aunque adaptados a comer los alimentos que presentan redobladas complicaciones mecánicas y químicas para su digestión, no se inclinan por esos alimentos. Por consiguiente, los gorilas de las montañas de Virunga no consumen alimentos duros y fibrosos durante todo el año porque los prefieran, sino porque es lo que pueden comer, dadas las opciones limitadas que presenta el bufé biosférico a una altitud tan elevada. De hecho, los gorilas de montaña que viven en altitudes más bajas optan por la fruta, si está a su alcance.

En el reino animal, la preferencia por alimentos distintos de aquellos a los que uno está adaptado no constituye un fenómeno infrecuente. Se conoce por «paradoja de Liem», en honor a Karel Liem, que fue profesor de la Universidad Harvard y la descubrió en 1980 en el cíclido de Minckley, un pez de agua dulce endémico del valle de Cuatro Ciénegas, en el norte de México. Una forma de este pez tiene una boca con dientes planos, parecidos a guijarros, muy idóneos para romper caracoles de concha dura. Sin embargo, los miembros de este grupo no prestan ninguna atención a los caracoles cuando encuentran otros alimentos más blandos. ¿Por qué un animal ha desarrollado, en el curso de la evolución, dientes especializados en alimentos que prefiere comer menos? Porque, en la medida en que una especialización en alimentos duros no impide consumir alimentos más blandos, el animal dispone de una espectro más amplio de opciones llegado el momento en que las necesita. La paradoja no es que los individuos eviten consumir alimentos para los que están adaptados, sino que una anatomía especializada les permite acceder a una dieta más generalista.



ALAIN HOULE

EL MANGABEYE DE MEJILLAS GRISES tiene dientes planos y con esmalte grueso; diríase que está especializado en la trituración de alimentos duros. La verdad es que solo recurre a ellos cuando no hay disponibilidad de frutas blandas y hojas.

Otros primates que ejemplifican la paradoja de Liem son los monos mangabeye de mejillas grises (*Lophocebus albigena*), del Parque Nacional de Kibale en Uganda. Los mangabeyes presentan molares planos con esmalte grueso, adecuados para triturar alimentos duros y quebradizos. Pero día tras día, mes tras mes, incluso año tras año, Joanna Lambert, ahora en la Universidad de Colorado en Boulder, los observó comer frutas carnosas y

blandas y hojas tiernas. Los mismos alimentos que consumían sus vecinos los guenones de cola roja, que tienen dientes con esmalte fino. Hasta que la situación cambió en el verano de 1997. El bosque sufrió una sequía muy severa, causada por un episodio de El Niño. Las frutas escasearon y las hojas se marchitaban; los monos pasaban hambre. Los mangabeyes se alimentaron de cortezas y semillas duras, no así los guenones. Los dientes y mandíbulas especializados de los mangabeyes les permitieron recurrir a este tipo de alimentos de masticación más correosa. Aun cuando tales adaptaciones fueran necesarias solo una o dos veces en cada generación, eso es justamente lo que necesitan los animales para sobrevivir en tiempos de escasez.

Aun así, la anatomía especializada puede también guardar relación con la preferencia por un tipo de alimentos. Por ejemplo, los mangabeyes grises del Parque Nacional de Taï, en Costa de Marfil, tienen un esmalte dental grueso y mandíbulas fuertes; prefieren alimentos duros. Dedican la mayor parte de su tiempo de forrajeo a rastrear el suelo del bosque en busca de semillas del árbol *Sacoglottis*, cuya cáscara recuerda el hueso de melocotón. Scott McGraw, de la Universidad Estatal de Ohio, propone que esta práctica les permitiría evitar competir por la comida con las otras 10 especies de primates que conviven con ellos. Al igual que los gorilas, que varían en la frecuencia en que consumen determinados alimentos, algunos mangabeyes los comen siempre; otros, en cambio, lo hacen solo en raras ocasiones.

Estos ejemplos muestran que la elección del alimento en los primates es un hecho complejo. No depende solo de los dientes, sino también de la disponibilidad, de la competencia y de la preferencia personal. La morfología dentaria puede decirnos algo sobre lo que un animal del pasado era capaz de comer y sobre cuál era el alimento más complicado al que podían enfrentarse sus antepasados. Mas, para obtener información relativa a sus elecciones entre las muchas opciones que ofrecía el bufé biosférico, necesitamos marcadores nutricionales.

La morfología dentaria nos ofrece pistas sobre qué alimentos podrían servirle a un animal y cuáles serían los que le supondrían mayores dificultades. Mas, para averiguar sus preferencias reales entre las opciones disponibles en el bufé biosférico, necesitamos recurrir a los marcadores nutricionales

Una de las formas más comunes en que se han obtenido marcadores nutricionales ha sido mediante el microdesgaste dental, las estrías y hoyuelos que quedan en la superficie de los dientes como resultado de su uso. Las especies que cortan alimentos fibrosos, como los antílopes cuando pastan en la pradera o los guepardos cuando comen carne, muestran en sus dientes estrías largas y paralelas como resultado del roce entre los dientes opuestos y los materiales abrasivos que son arrastrados con el bocado al masticar. Las especies que trituran alimentos duros, como los mangabeyes de Taï, que comen nueces, o las hienas, que rompen huesos, tienden a presentar una superficie de microdesgaste llena de pequeños cráteres u hoyuelos de diferentes tamaños y formas.

Estas marcas generalmente se desgastan y se reescriben al cabo de pocos días. Así podemos saber algo sobre la variedad, y tal vez incluso las proporciones de los tipos de alimentos, si muestreamos los dientes de distintos individuos en diferentes momentos y lugares. Los patrones de microdesgaste de los mangabeyes de Kibale se parecen típicamente a los de los frugívoros de frutos blandos, con estrías finas y hoyuelos pequeños, aunque en algunos especímenes la superficie horadada es mayor. En cambio, los dientes de los mangabeyes de la selva de Taï tienen en promedio un mayor número de pequeños cráteres en su superficie. A pesar de que las formas de los dientes son muy similares en ambas especies, los marcadores nutricionales permiten distinguir una de otra, de acuerdo con lo predicho, en razón de la observación directa de su dieta.

MENÚS DEL PASADO

A partir de los patrones de microdesgaste de animales vivos cuyos hábitos alimentarios se conocen de primera mano gracias a la observación, los científicos se sirven de los patrones de microdesgaste de dientes fósiles para inferir la ingesta de especies extintas y hacerse una idea sobre sus preferencias alimentarias. Con este objetivo, junto con mis colaboradores hemos dedicado mucho esfuerzo a analizar el microdesgaste en fósiles humanos. Nuestro trabajo ha generado resultados sorprendentes.

El árbol filogenético de los humanos posee muchas ramas. En la actualidad, *Homo sapiens* es la única especie humana viva, pero en el pasado hubo múltiples especies humanas, los homininos, que convivieron simultáneamente en el planeta. La razón por la que nuestro linaje sobrevivió y otros se extinguieron es una pregunta recurrente. Mi propia incursión en ese enigma comenzó cuando me propuse estudiar la dieta de los miembros de una de estas ramas extintas, un grupo de especies que pertenecieron al género *Paranthropus* y que vivieron en África oriental y meridional hace entre unos 2,7 millones y 1,2 millones de años, durante el Pleistoceno. Ninguna de las especies de *Paranthropus* es antepasado directo nuestro; antes bien, se consideran experimentos evolutivos que convivieron con nuestros auténticos antepasados. Los *Paranthropus* tenían premolares y molares grandes, planos y con un esmalte grueso y mandíbulas muy robustas, además de crestas y estrías muy marcadas en los huesos que indicaban que gozaban de grandes y poderosos músculos masticadores. Estos rasgos constituyen unos indicadores claros de un aparato masticador muy especializado, por lo que tales especies eran candidatas ideales para los análisis de microdesgaste. Si junto con mis colaboradores no lográbamos averiguar qué comían, perdíamos la esperanza de reconstruir la dieta de otros homininos fósiles cuyos dientes y mandíbulas se presentaban más anodinos.

Ya en el año 1954, el paleoantropólogo John Robinson se propuso reconstruir la dieta de *Paranthropus*. Robinson creía que los premolares y molares grandes, planos y con un esmalte poderoso del *Paranthropus robustus* de Sudáfrica habían sido adquiridos

en el curso de la evolución para masticar partes de las plantas, como brotes y hojas, bayas y frutos silvestres resistentes. Los desgastes y mermas de algunos dientes le sugirieron que *P. robustus* comía raíces y bulbos que podían tener restos de tierra. Phillip Tobias, de la Universidad de Witwatersrand, en Johannesburgo, vio las cosas de manera diferente y en la década de 1960 concluyó que tales daños dentarios se produjeron durante el consumo de alimentos duros y no porque contuviesen arenilla. En ese momento, Tobias andaba concentrado en la descripción de una nueva especie de *Paranthropus* del este de África, *P. boisei*. De acuerdo con una leyenda, muy verosímil después de todo, entre paleontólogos, al contemplar su cráneo por primera vez, Tobias exclamó: «Nunca he visto un conjunto más notable de cascanueces».

Así surgió la idea del hominino especializado en cascar nueces. En comparación con los fósiles de los primeros *Homo* recuperados en los mismos depósitos sedimentarios, los *Paranthropus* presentaban unos dientes y mandíbulas más gráciles, cerebros de mayor tamaño, y contaban con un kit de herramientas líticas que les permitía procesar alimentos. Los investigadores propusieron una explicación muy clara para estas diferencias; dieron en llamarla «hipótesis de la sabana». A medida que la sabana empezó a extenderse por África, nuestros antepasados llegaron a una bifurcación evolutiva en el camino. Los *Paranthropus* tomaron una dirección y evolucionaron para especializarse en el consumo de algunas partes de las plantas de la sabana, como semillas y raíces, mientras que los primeros representantes del género *Homo* tomaron otra dirección y se volvieron cada vez más versátiles, con una dieta flexible que incluía carne. Según esta hipótesis, semejante flexibilidad dietética es la razón por la que estamos aquí hoy en día y los *Paranthropus* se extinguieron. Esta explicación triunfó y los primeros estudios de microdesgaste realizados por Frederick Grine, de la Universidad de Stony Brook, en la década de 1980, mostraron que los dientes de *P. robustus* tenían más agujeros de microdesgaste que sus propios antepasados, lo que parecía confirmar que nuestro primo evolutivo estaba especializado en consumir alimentos duros y quebradizos.

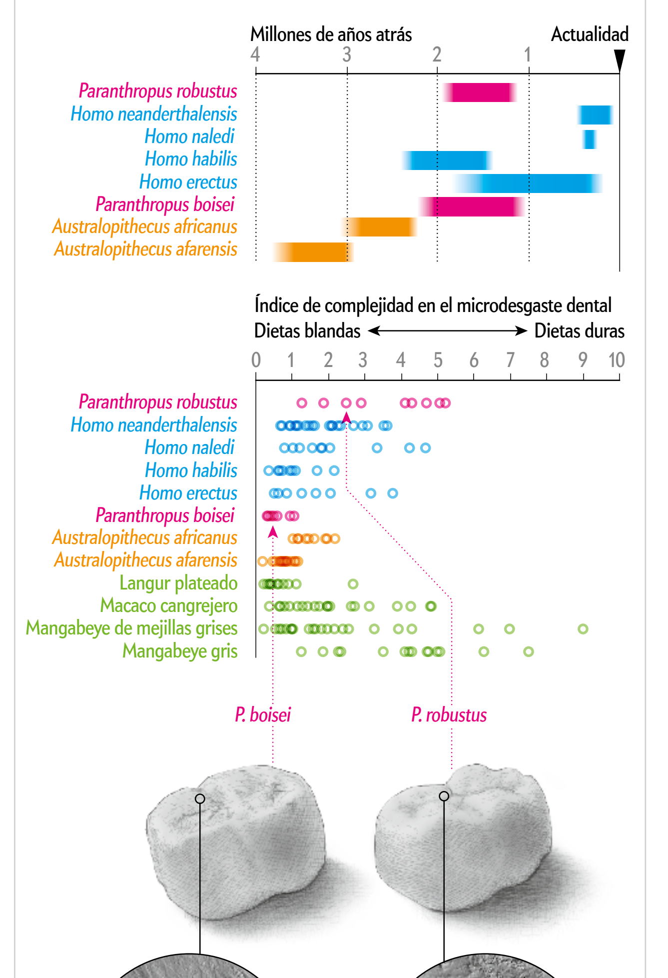
Pero en 2005, cuando el investigador posdoctoral Rob Scott y yo mismo volvimos a analizar el microdesgaste de *P. robustus* con una técnica más novedosa, empezó a escribirse otra parte del relato. Era cierto que los dientes de *P. robustus* presentaban, en promedio, un microdesgaste más complejo y superficies tachonadas de un mayor número de hoyuelos, pero algunos de los especímenes que estudiamos tenían superficies más simples y menos horadadas. De hecho, el microdesgaste de *P. robustus* variaba mucho y sugería que, aunque algunos individuos comieron alimentos duros en los días previos a su muerte, otros no. Con otras palabras, la anatomía especializada de *P. robustus* no significaba que se atuviera a una dieta especializada. No era una idea inédita, ya que, a partir de pruebas, David Strait, ahora en la Universidad de Washington en St. Louis, y Bernard Wood, de la Universidad George Washington, habían especulado, un año antes, con la posibilidad de que *Paranthropus* hubiera sido más generalista en su ecología y con una dieta más flexible. Pero nuestro trabajo proporcionaba pruebas directas en pro de la paradoja de Liem entre los homininos.

En 2008, cuando junto con mis colaboradores estudiábamos los patrones de microdesgaste de *P. boisei*, nos encontramos con una sorpresa aún mayor. Esta especie, a la que

FILOGENIA DENTARIA

Marcadores nutricionales

Como resultado de su uso, en la superficie de los dientes quedan una serie de estrías y hoyuelos. El estudio de los patrones de microdesgaste en los animales vivos muestra que las especies que consumen alimentos blandos y resistentes, como las herbáceas, muestran estrías largas y paralelas, mientras que los que comen alimentos duros y quebradizos, como los frutos secos, tienen un mayor número de agujeros. Los paleontólogos han inferido la dieta de especies humanas extintas, *Paranthropus robustus* y *Paranthropus boisei*, entre otros, a partir de los patrones de microdesgaste observados en dientes fósiles.



De acuerdo con la investigación precedente, que se basaba en la forma de los dientes, *P. robustus* se nutría de plantas fibrosas, en tanto que *P. boisei* se especializó en cascar nueces. Sin embargo, el estudio del microdesgaste revela que *P. robustus* tenía un patrón complejo de estrías y agujeros que apunta hacia una dieta más omnívora. Por su parte, *P. boisei* no mostraba ninguno de los agujeros que esperaríamos ver en un primate cascanueces. Algunos análisis químicos posteriores han indicado que la dieta de *P. boisei* se componía, sobre todo, de plantas herbáceas.

PETER S. UNGAR (*datos y simulaciones de microdesgaste*); PORTIA SLOAN ROLLINGS (*dientes*); JEN CHRISTIANSEN (*gráficos*)





DIETAS DIVERGENTES: Mientras que *Paranthropus boisei* (*1*) se especializó en comer gramíneas o ciperáceas, su contemporáneo *Homo habilis* (*2*) parece que prefería una dieta más diversa.

JOHN R. FOSTER, SCIENCE SOURCE

Tobias calificara de cascanueces, poseía los dientes y mandíbulas mayores y con el esmalte más poderoso de todos los homininos. Esperaba que los dientes de *P. boisei* sufrieran un microdesgaste similar al de los mangabeyes grises, con una superficie craterizada a la manera de la superficie lunar. Muy al contrario. Uno tras otro, los dientes ofrecían el mismo patrón: pequeñas estrías que surcaban la superficie dentaria. Estos animales no solo no estaban especializados en comer alimentos duros, sino que tampoco se veía ninguna huella de que los consumiesen. La hipótesis del cascanueces parecía caerse como un castillo de naipes soplado por el viento. Pero entonces, ¿qué es lo que comía *P. boisei* con semejantes dientes, grandes y planos? La respuesta tendría que esperar la aportación de otro conjunto de marcadores nutricionales: la razón entre isótopos de carbono.

Hay signaturas químicas distintivas de los alimentos que proporcionan la materia prima con la que se construye el cuerpo y que a veces se conservan en los dientes. De la misma forma que el microdesgaste, estas huellas químicas pueden ser leídas e interpretadas. Por ejemplo, en comparación con los árboles y los arbustos, los pastos tropicales encierran una mayor proporción de átomos de carbono con siete neutrones, en vez de los seis habituales. Como resultado, los dientes de los animales que se alimentan de gramíneas tropicales contienen una mayor proporción de carbono «pesado».

La razón entre isótopos de carbono en dientes de *P. robustus* indica una dieta dominada por árboles y arbustos, pero con una contribución importante de gramíneas o ciperáceas. Este hallazgo concuerda con la dieta más amplia deducida a partir del microdesgaste. Pero *P. boisei* muestra un patrón muy distinto, con una proporción de isótopos de carbono que sugiere que gramíneas y ciperáceas constituían al menos tres cuartas partes de su dieta.

Este resultado constituyó toda una sorpresa para muchos paleoantropólogos. ¿Homininos como vacas? Seguramente ningún miembro respetable de nuestro árbol genealógico se mantendría vivo consumiendo hierba. Pero el hallazgo sí tenía sentido para mí. Se trataba de especies que evolucionaron a medida que la sabana se iba expandiendo en África oriental y meridional, y el bufé biosférico se iba cubriendo de hierba. Si *P. boisei* estaba moliendo gramíneas o ciperáceas con sus dientes grandes y planos y con poderosas mandíbulas, en vez de aplastar alimentos duros y quebradizos, debería reflejar exactamente el patrón de microdesgaste que habíamos encontrado. Esta dieta habría también de explicar por qué los molares de *P. boisei* se desgastaban con tanta celeridad.

De la mera observación de sus imponentes dientes planos no hubiéramos inferido nunca que las dos especies de *Paranthropus* utilizaron su anatomía de manera diferente e inesperada, pero los marcadores nutricionales así lo indicaban. A la manera de los mangabeyes de Kibale, *P. robustus* debió de seguir una dieta generalista, con algunos alimentos duros incluidos. Pero en *P. boisei*, la relación entre dientes y régimen alimentario parece haber sido muy diferente de la que observamos en cualquier primate actual. Los dientes grandes y planos no son ideales para triturar hierba, pero cada uno trabaja con lo que tiene. Si una superficie más extensa de masticación era mejor que lo que disponían sus homininos antepasados, este rasgo se seleccionaría aunque no fuera la estructura óptima para realizar la tarea en cuestión.

El microdesgaste de nuestros antepasados directos, especies que pertenecen al género *Homo*, señala una estrategia de alimentación claramente diferente. Nuestro grupo ha estudiado dos especies iniciales del género: *Homo habilis*, un hominino más «primitivo», con un cerebro reducido y algunas características todavía relacionadas con la vida en los árboles, y *Homo erectus*, un hominino de cerebro más potente y mejor adaptado a la deambulación bípeda. Las muestras de las que disponemos escasean, pues necesitamos dientes en perfecto estado de con-

servación y no hay muchos. Pero en ellos se observa un patrón muy interesante en comparación con el de *Australopithecus afarensis*, su posible antepasado, y *P. boisei*, con el que convivió. *H. habilis* ofrece una mayor variación en cuanto a patrones de desgaste, que van desde superficies complejas muy horadadas hasta superficies simples con estrías. El hallazgo sugiere que *H. habilis* se nutría de un espectro más amplio de alimentos que cualquiera de sus antepasados o de sus contemporáneos. Su sucesor, *H. erectus*, exhibe patrones de microdesgaste más variables, lo que podría revelar una dieta aún más amplia.

Estos resultados se ajustan perfectamente a un modelo muy aceptado sobre la influencia de los cambios climáticos en la evolución humana, propuesta que viene a sustituir la hipótesis de la sabana. A mediados de la década de 1990, los estudios de los sondeos del fondo oceánico realizados por el geólogo Nicholas Shackleton mostraron que la historia de los cambios climáticos era más compleja de lo que presumía la hipótesis de la sabana. Las condiciones sí se volvieron más frías y secas a largo plazo, pero hubo también pequeños vaivenes en el clima de corto recorrido, y estos ciclos se hicieron más frecuentes e intensos en el curso de la evolución humana.

Rick Potts, de la Institución Smithsoniana, propuso que esta pauta de clima inestable debería favorecer a las especies más versátiles, incluidos los homininos, una idea que se denominó «hipótesis de la selección de la variabilidad». Durante el Pleistoceno, África dejó de ser un lugar ideal para ser exigente con la comida. Según Potts, no fue tanto la propagación de las gramíneas de sabana lo que impulsó la evolución humana, cuanto la necesidad de ser flexibles en la dieta. Bajo esta perspectiva, el cerebro mayor de los *Homo* y la fabricación de útiles de piedra les permitían disponer de una mayor variedad de alimentos. Estos rasgos habrían permitido que nuestros antepasados sobreviviesen a los vaivenes ambientales, cada vez más intensos, y resistieran en aquellas situaciones en las que la naturaleza ofrecía y retiraba alimentos del bufé biosférico. La creciente variación en la complejidad del microdesgaste, de *A. afarensis* a *H. erectus*, pasando por *H. habilis*, sería una prueba directa de la selección de la variabilidad.

La idea de Potts ha resistido el paso de los veinte años transcurridos desde su propuesta, pese a que otros autores se han apoyado en ella para sus propias elaboraciones y hayan aparecido nuevos datos sobre la conjunción de cambios operados en los ecosistemas y la órbita terrestre en torno al Sol para crear las condiciones en que se desarrolló la evolución humana. Por ejemplo, en 2009 Mark Maslin, del Colegio Universitario de Londres, y Martin Trauth, de la Universidad de Potsdam, sugirieron que las oscilaciones climáticas llenaron y vaciaron los lagos de África oriental, lo cual dificultó la vida en las cuencas del Rift. Tales fluctuaciones pudieron haber causado la fragmentación y la dispersión de las poblaciones de homininos, motores de evolución humana. La capacidad de perseguir una dieta más variada pudo ayudar a sobrevivir en tiempos tan turbulentos.

APETITO Y EVOLUCIÓN

Las pruebas recabadas nos facultan ya para dibujar un cuadro plausible de la adaptación de los primeros homininos a su mundo cambiante; pero a grandes rasgos, es decir, sin finura en los detalles. El principal reto para entender la manera en que el cambio climático se convirtió en motor de la evolución está en acertar a la hora de poner en relación episodios climáticos específicos del pasado con los cambios observados en el registro fósil.

El entorno local reacciona ante cambios climáticos globales e incluso regionales de manera muy dispar. Añádase que nuestro registro fósil no es lo suficientemente completo como para indicar con precisión dónde y cuándo aparecieron y desaparecieron determinadas especies. Nos podemos equivocar por más de 1500 kilómetros y más de 100.000 años. Podríamos asociar la extinción o la evolución de una especie con un evento catastrófico masivo que afectase globalmente a la Tierra, como el impacto del asteroide en la península de Yucatán que provocó la extinción de los dinosaurios hace 66 millones de años. Pero los episodios climáticos que relacionamos con la evolución humana son muy diferentes: se trata de ciclos alternantes de fases climáticas secas y frías, intercaladas por otras fases cálidas y húmedas. El hecho de que los homininos sean probablemente especies flexibles, capaces de adaptarse a una amplia gama de hábitats y a los alimentos disponibles en su ámbito, emborrona todavía más el cuadro. Nuestra apuesta más segura para entender cómo respondieron los homininos a los entornos cambiantes reside en el pasado más reciente, en lugares donde han sido excepcionalmente bien estudiados.

Las investigaciones publicadas en los últimos dos años por Sireen El Zaatari, de la Universidad de Tubinga, Kristin Krueger, de la Universidad Loyola de Chicago, y sus colaboradores revelan que semejante enfoque podría funcionar. Sus estudios sobre microdesgaste en los neandertales y en los humanos anatómicamente modernos que los sustituyeron en Eurasia nos han permitido abordar el misterio de este reemplazamiento desde una nueva perspectiva. Los neandertales habitaron Europa y Asia occidental hace entre unos 400.000 y 40.000 años, hasta que se extinguieron. Los paleoantropólogos han debatido durante más de un siglo sobre las causas de su extinción y todavía no se ha alcanzado el consenso mayoritario.

Aunque la divulgación popular de la ciencia ha retratado en muchas ocasiones a los neandertales como seres brutales que vivieron en condiciones casi glaciales, envueltos en pieles de animales y ahítos de carne de mamut y de rinoceronte lanudo, esta imagen no siempre se corresponde con la realidad. Los neandertales ocuparon una amplia gama de hábitats, de estepas frías y secas a bosques templados y húmedos, y las condiciones variaron a lo largo del tiempo y de la geografía. Los estudios de sus molares muestran que los que vivieron en entornos más boscosos o mixtos reflejaban un patrón de microdesgaste muy complejo y con numerosos agujeros, lo que indica una dieta de alimentos más duros, quebradizos y quizás alimentos vegetales abrasivos. En cambio, los neandertales que vivieron en estepas abiertas tenían patrones de microdesgaste en los molares menos complejo, algo que El Zaatari y sus colaboradores han interpretado como indicativo de una dieta menos variada, principalmente

de carne blanda. Por su parte, Krueger encontró diferencias en el microdesgaste de los incisivos entre los dos grupos; las atribuye a que los neandertales de las estepas habrían utilizado sus incisivos para procesar pieles de animales, mientras que los que habitaban los bosques habrían comido mayor diversidad de alimentos. Curiosamente, estas diferencias se mantienen cuando se analizan los neandertales más antiguos o los más recientes. Parece, pues, que los neandertales contaban con una dieta flexible, adaptada a su hábitat y a la disponibilidad del medio.

Sin embargo, aunque los humanos anatómicamente modernos que llegaron a Europa lo hicieron durante la última glaciación, es otro su patrón de microdesgaste. No hay mucha divergencia entre los molares de individuos que habitaron ambientes abiertos de aquellos que ocuparon hábitats mixtos con vegetación más arbolada. Tampoco hay diferencias entre individuos antiguos o más recientes. Tal vez, los humanos modernos que llegaron a Europa eran mejores que los neandertales a la hora de obtener sus alimentos predilectos cuando se enfrentaban a cambios ambientales.

ALIMENTO PARA EL CEREBRO

Los estudios sobre la dieta de los primeros humanos influyen en lo que la gente de hoy piensa que debe comer para estar saludable, aunque quizá no de la forma en que la mayoría podría imaginar. Los partidarios de la así llamada «dieta paleolítica» aducen que deberíamos comer los tipos de alimento hacia los que se fueron adaptando nuestros antepasados. Muchas de las enfermedades crónicas degenerativas que padecemos estarían vinculadas a la disparidad entre la dieta que consumimos y los alimentos a los que está adaptado nuestro organismo. Y ciertamente no podemos olvidar que nuestros remotos antepasados ni comían copos de maíz ni bebían batidos.

Sin embargo, eso no quiere decir que debamos seguir una dieta paleolítica específica. Los marcadores nutricionales nos han enseñado que las dietas de los hominios variaron a lo largo del tiempo y en diferentes sitios. Los cambios climáticos persistentes, los diversos hábitats y la variación en la disponibilidad de alimentos nos han impulsado muy probablemente a adoptar una dieta flexible. En otras palabras, no existe un único tipo de dieta ancestral que podamos replicar. La versatilidad dietética posibilitó que nuestros antepasados se propagaran por todo el planeta y hallaran siempre algo que comer en la miríada de bufés biosféricos. Ahí residió la clave de nuestro éxito evolutivo. IyC

PARA SABER MÁS

Dental microwear and diet of the plio-pleistocene hominin *paranthropus boisei*. Peter S. Ungar en *PLOS ONE*, vol. 3, n.º 4, art. n.º e2044, 30 de abril de 2008.
The diets of early hominins. Peter S. Ungar y Matt Sponheimer en *Science*, vol. 334, págs. 190-193, 14 de octubre de 2011.
Neandertal versus modern human dietary responses to climatic fluctuations. Sireen El Zaatari en *PLOS ONE*, vol. 11, n.º 4, art. n. e0153277, 27 de abril de 2016.

EN NUESTRO ARCHIVO

Cambios climáticos y evolución humana. Peter B. deMenocal en *IyC*, noviembre de 2014.

SALUD PÚBLICA

LA LUCHA CONTRA LOS MOSQUITOS

A medida que se extienden las enfermedades transmitidas por los mosquitos, los científicos contraatacan con nuevos venenos, trampas y técnicas de ingeniería genética

Dan Strickman

EN SÍNTESIS

Los mosquitos son responsables de más de 725.000 muertes al año, lo que los convierte en las criaturas más mortíferas del planeta.

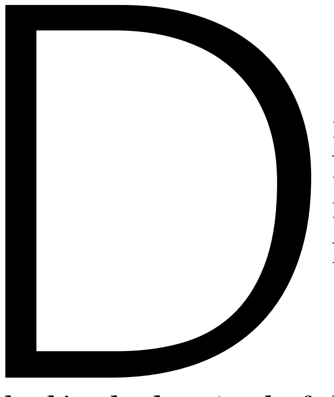
El cambio climático y la globalización aumentan la amenaza de los insectos, y los mosquitos desarrollan resistencia a los insecticidas habituales.

Los expertos en el control de vectores contraatacan con nuevas herramientas, que van de trampas muy sencillas a métodos de modificación genética.





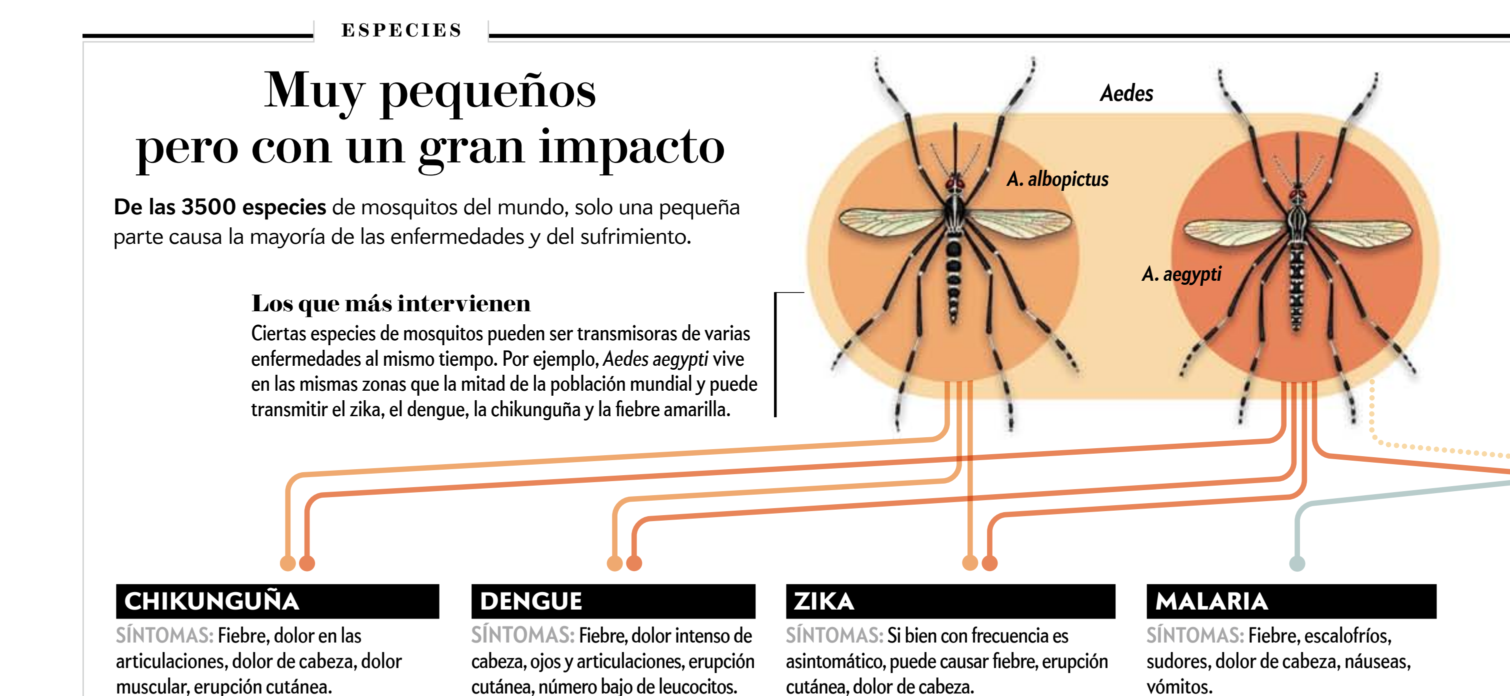
Dan Strickman es entomólogo médico y dirige las actuaciones de control de vectores de la Fundación Bill y Melinda Gates.

ESDE UN LEJANO PASADO LUCHAMOS CONTRA los mosquitos, que con solo dos picaduras —la que absorbe un microorganismo patógeno y la que lo transmite— tantas epidemias han causado. La malaria cundió en África cuando los seres humanos se juntaron para las tareas agrícolas. En la década de 1870, la fiebre amarilla casi aniquiló Memphis, en Tennessee, donde la urbanización y el transporte fluvial habían concentrado a personas y mosquitos infectados. Hay arqueólogos que creen que las enfermedades transmitidas por ellos aceleraron la caída del Imperio romano.

Según la Fundación Bill y Melinda Gates, donde soy director de control de vectores, el número de fallecidos causado por los mosquitos es, hoy, de unas 725.000 al año (a manos de otras personas son 475.000 las que mueren anualmente). Los mosquitos lastran el crecimiento económico donde la población está expuesta a ellos durante gran parte del año, como en el África subsahariana y algunas zonas de Sudamérica y Asia. Han llevado a la muerte a más personas que todas las guerras de la historia juntas.

Parecía que derrotaríamos a los mosquitos. En 1939, Paul Hermann Müller descubrió que una sustancia sintética, incolora e insípida, el diclorodifeniltricloroetano, o DDT, era un excelente insecticida. Se utilizó en gran número de hogares, granjas y bases militares, e hizo el milagro de suprimir la malaria en algunas de las regiones más castigadas. Müller ganó el premio Nobel en 1948. Pero afectaba a la salud humana y tenía un alto coste ambiental. Se acumulaba en los peces, las plantas y el tejido adiposo de los mamíferos, y causaba así estragos en la cadena alimentaria. Cuando ciertas aves, como el águila americana, los quebrantahuesos y los halcones, ingerían pescado contaminado con DDT, afectaba a los huevos;

PÁGINAS ANTERIORES: GETTY IMAGES



su población mermó mucho. A comienzos de la década de 1970, el empleo del DDT se restringió en gran medida y los mosquitos —y la malaria— medraron de nuevo.

En los últimos decenios, el cambio climático y la globalización se han conjugado para agravar la amenaza de los mosquitos y han convertido las enfermedades transmitidas por estos en un problema cada vez más habitual en muchos lugares. El año pasado, alrededor de 2000 personas contrajeron el virus del Nilo Occidental en EE.UU. En los últimos cinco, el de la chikunguña (que provoca dolor intenso en las articulaciones) se extendió por 45 países y causó más de dos millones de infecciones conocidas, con múltiples y grandes brotes en EE.UU. Y aunque en 2018, hasta mediados del año, solo se habían producido 21 casos de zika en ese país (en viajeros procedentes de zonas afectadas), sigue siendo un problema en muchas partes del mundo. En 2016 se comunicaron en EE.UU. más de 47.000 casos de enfermedad humana causados por mosquitos; una década antes no llegaban a 7000.

Las mejores estrategias para el control de los mosquitos son las que se centran en las especies que contagian enfermedades y en destruir un número suficiente de individuos para que se interrumpa la transmisión. Pero cada vez es más evidente que las armas de que disponemos están fallando: los mosquitos han desarrollado resistencia a muchos de los insecticidas con que se impregnan las mosquiteras de cama que protegen contra la malaria y, como ha demostrado el zika en los últimos años, es muy difícil exterminar ciertas especies de mosquitos que, como *Aedes aegypti,* viven en las casas y proliferan en depósitos muy pequeños de agua estancada.

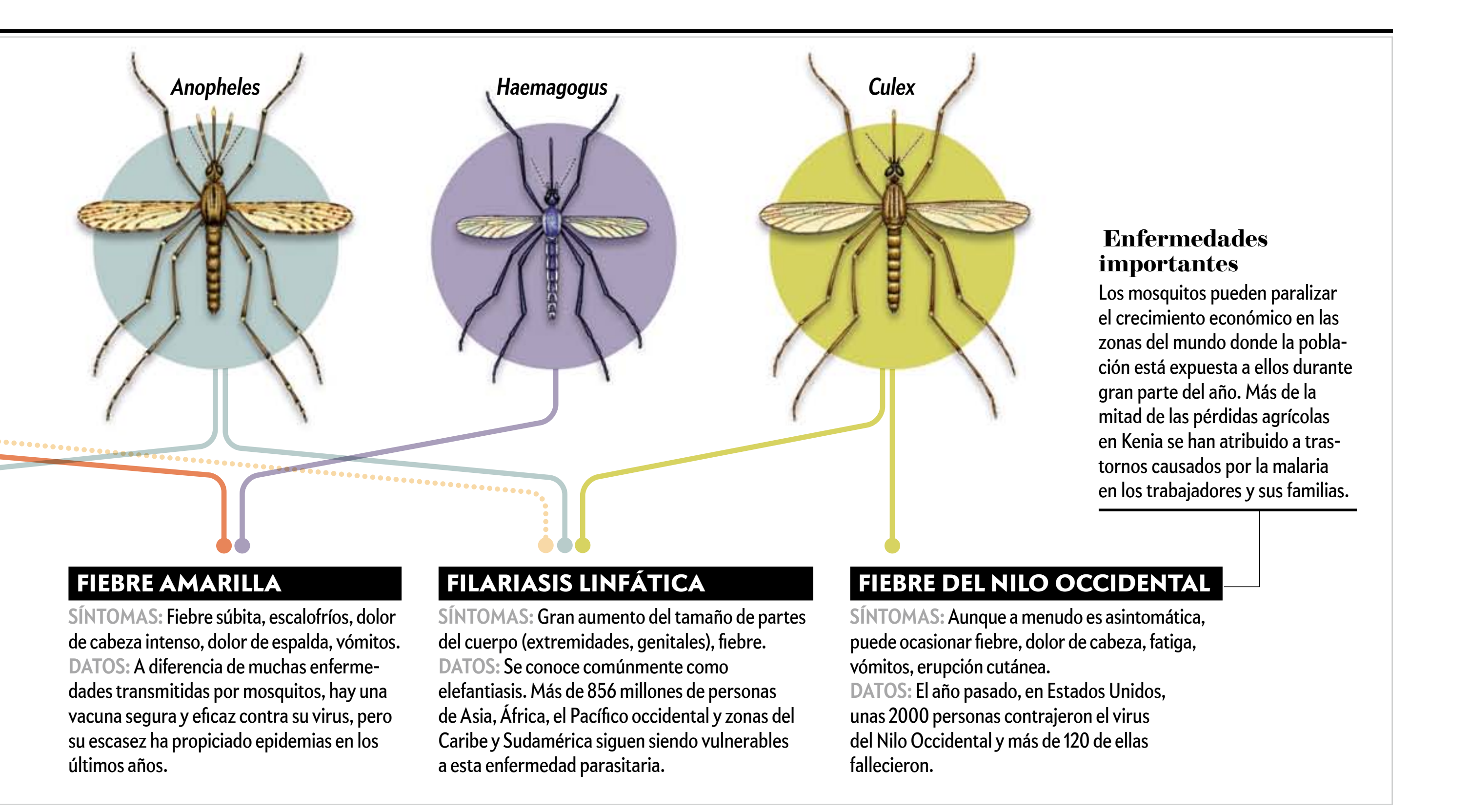
Para frenar esta tendencia se han creado nuevas herramientas de control de los mosquitos: mejores insecticidas y trampas, e incluso la irradiación o la manipulación genética esterilizadoras. Aunque la idea de algunos de estos métodos tiene ya bastantes años, los progresos técnicos, las inversiones de muchos grupos, como el nuestro, y la aceptación de que la lucha contra los mosquitos es parte del control de las enfermedades le han devuelto actualidad a esas estrategias.

UNA TRAMPA MÁS EFICAZ

La malaria es especialmente mortífera. La contrajeron 216 millones de personas en 2016; 445.000 fallecieron. Ciertas especies de mosquitos *Anopheles* son portadoras del *Plasmodium*, el parásito causante de la malaria. Cuando los mosquitos hembra pican a seres humanos para obtener nutrientes para sus huevos (los machos no pican), puede que lo adquieran. Se reproduce en su intestino y se traslada a sus glándulas salivales. Alrededor de una semana más tarde, cuando el mosquito se alimenta de nuevo, el parásito pasa con su saliva a un nuevo huésped humano, donde se infiltra en el hígado y el torrente circulatorio y provoca la enfermedad o la muerte.

El alarmante número de víctimas ha impulsado un esfuerzo por controlar los mosquitos mayor y mejor financiado. En 2016, se gastaron 2700 millones de dólares en la investigación y erradicación de la malaria. El mayor obstáculo sigue siendo el de eliminar los insectos en su ambiente al mismo tiempo que se minimiza el daño a los humanos y a la vida silvestre. Aquí es donde entran los «tubos de respiradero». En la mayoría de las casas tropicales hay unos vanos en los muros exteriores, bajo los aleros. Los mosquitos detectan la presencia de los humanos de muchas maneras; por ejemplo, siguiendo el dióxido de carbono expulsado a través de los respiraderos. Los investigadores están instalando tubos de respiradero que cierran esos vanos y reducen la transmisión de la malaria. Se trata de un dispositivo sencillo y seguro: un tubo de plástico y una rejilla electrostática

INVESTIGACIÓN: AMANDA HOBBS; IMMY SMITH (*ilustración*)



FIEBRE AMARILLA

SÍNTOMAS: Fiebre súbita, escalofríos, dolor de cabeza intenso, dolor de espalda, vómitos.
DATOS: A diferencia de muchas enfermedades transmitidas por mosquitos, hay una vacuna segura y eficaz contra su virus, pero su escasez ha propiciado epidemias en los últimos años.

FILARIASIS LINFÁTICA

SÍNTOMAS: Gran aumento del tamaño de partes del cuerpo (extremidades, genitales), fiebre.
DATOS: Se conoce comúnmente como elefantiasis. Más de 856 millones de personas de Asia, África, el Pacífico occidental y zonas del Caribe y Sudamérica siguen siendo vulnerables a esta enfermedad parasitaria.

FIEBRE DEL NILO OCCIDENTAL

SÍNTOMAS: Aunque a menudo es asintomática, puede ocasionar fiebre, dolor de cabeza, fatiga, vómitos, erupción cutánea.
DATOS: El año pasado, en Estados Unidos, unas 2000 personas contrajeron el virus del Nilo Occidental y más de 120 de ellas fallecieron.

Enfermedades importantes

Los mosquitos pueden paralizar el crecimiento económico en las zonas del mundo donde la población está expuesta a ellos durante gran parte del año. Más de la mitad de las pérdidas agrícolas en Kenia se han atribuido a trastornos causados por la malaria en los trabajadores y sus familias.

tratada con un polvo insecticida. Convierte la casa en una trampa para los mosquitos; el cebo son las personas. Cuando aquellos intentan penetrar en la casa a través del tubo, se posan en la rejilla recubierta de insecticida y mueren.

Se lleva casi diez años probando tubos de respiradero sobre el terreno. Los resultados preliminares de un ensayo de campo de 2016-2017 en Costa de Marfil, realizado por la Universidad Estatal de Pensilvania y con cooperación europea y africana, indican que, en las casas donde se instalaron, la transmisión de la malaria a los niños se redujo un 40 por ciento. Se espera que, con el tiempo, esos tubos sustituyan al rociado de insecticida en interiores, que funciona bien pero es más difícil de aplicar y requiere más producto. Los tubos de respiradero también son más seguros para los niños, ya que el insecticida está situado demasiado alto. Además, reducen el desarrollo de resistencia. Cuando los insectos intentan penetrar a través de sus pequeños agujeros, el polvo los recubre y la dosis es mucho mayor que cuando se posan brevemente sobre una superficie tratada con insecticida, así que su destrucción es más probable.

Pero no todos los mosquitos se alimentan en las casas y no todas las casas son adecuadas para los tubos. Unos científicos israelíes han desarrollado cebos de azúcar con insecticida que atraen a los mosquitos tanto machos como hembras. Liberan dosis de veneno mayores que otras trampas: los insectos confunden el veneno con el azúcar que necesitan e ingieren en el cebo una cantidad igual al 20 por ciento de su peso. Los insectos vuelan hasta el producto que se ensaya (que viene a ser del tamaño de una hoja estándar de papel) y pican a través de una lámina con pequeñas cavidades que contienen el veneno. Experimentos de campo realizados en Mali han puesto de manifiesto que los pequeños orificios de la membrana permiten que los mosquitos y otros insectos que se alimentan de sangre accedan al veneno, inaccesible para polinizadores como las abejas.



EN MALI, trabajadores del Centro de Investigación y Formación sobre la Malaria, de la Universidad de Bamako, comprueban una trampa para mosquitos que incluye un cebo de azúcar.

En un reciente congreso de medicina tropical, se comunicó que al colgar dos trampas en el exterior de las casas de un poblado de Mali casi la mitad de los mosquitos de la malaria de su entorno ingirieron el veneno. (Para contarlos se capturó una muestra y se examinó su intestino en busca de señales de unos colorantes añadidos al cebo con insecticida, que confirman que los mosquitos han visitado las trampas e ingerido el producto.) Gracias a esta intervención, alrededor del 90 por ciento de los mosquitos hembra de la zona morían al poco de ingerir el veneno, antes de que con su picadura transmitiesen la malaria.

CONTROL DE LA NATALIDAD DE LOS MOSQUITOS

¿Y si en lugar de matar a los mosquitos se les impidiese nacer? La Agencia Internacional de Energía Atómica de las Naciones Unidas dirige un plan que liberará mosquitos macho esterilizados por la exposición a radiaciones ionizantes, que impiden el desarrollo celular en los testículos. La idea es que estos insectos estériles criados en el laboratorio se apareen con hembras silvestres, cuyos huevos nunca prosperarán. Como la mayoría de las hembras solo se aparean una vez en la vida, se reduciría mucho la población de mosquitos.

En otro proyecto, patrocinado por las Naciones Unidas y ejecutado por el Instituto de Investigación de Medicina Tropical del Sudán, se están produciendo en masa mosquitos estériles *Anopheles arabiensis*, el vector de la malaria de mayor prevalencia allí. A comienzos de los años cincuenta, el entomólogo estadounidense Edward Knipling empleó esa estrategia, la «técnica de obtención de insectos estériles», con la mosca del gusano barrenador del ganado, que deposita los huevos en las heridas del ganado y del ser humano; las larvas («gusanos») se alimentan del tejido vivo. Llevó varias décadas, pero para 2006 se había erradicado ese insecto en América del Norte y Central; los ganaderos se ahorraron miles de millones de dólares al año.

La esterilización ofrecería a vastas regiones, con un mínimo de mantenimiento, una solución casi permanente del problema de los mosquitos. Sí requiere organización e infraestructura, sin grandes posibilidades de beneficio económico, por lo que ha sido explorada por los Gobiernos, no por las empresas privadas.

Estas, movidas por el renovado interés en el control de los mosquitos tras la crisis del zika, ponen sus esperanzas en un tipo diferente de esterilización que consiste en modificar la carga genética de los insectos. Para librar a Brasil de los mosquitos

GUNTER MULLER, UNIVERSIDAD DE BAMAKO

vectores del dengue y del zika, la empresa Oxitec ha soltado en el medio silvestre mosquitos modificados mediante ingeniería genética que transferirán un gen que mata a los vástagos de las hembras. Los insectos modificados se aparean con otros silvestres y el carácter genético se disemina rápidamente. Durante una liberación experimental de estos mosquitos de laboratorio en un suburbio de Juazeiro, en el noreste de Brasil, el número de *A. aegypti* se redujo un 95 por ciento en nueve meses. En otras dos ciudades brasileñas también se notificaron éxitos. Este trabajo sigue siendo controvertido, ya que persisten las dudas sobre las consecuencias medioambientales.

La esterilización genética podría tardar años en funcionar a gran escala, pero hay otra opción. Unos investigadores del Colegio Imperial de Londres sostienen que deberíamos utilizar herramientas de «impulso génico» para propiciar con rapidez cambios genéticos específicos en la población de mosquitos. La mejor manera de controlar la malaria, según explican, es utilizar técnicas de edición genética, como CRISPR, para introducir un gen específico en insectos individuales y luego «impulsar» esta modificación en el conjunto de la población. El sistema de edición CRISPR se codifica en el ADN de un insecto embrionario, lo que garantiza que el carácter se transferirá a la descendencia. En teoría, después de muchas generaciones, toda la población de insectos será portadora de ese gen, lo que superaría las reglas naturales de herencia, en las que los organismos generados sexualmente tienen una probabilidad 50-50 de heredar un gen de cada progenitor, ya que el cambio deseado se realiza en ambos cromosomas.

Para controlar la malaria, la modificación genética podría transformar los mosquitos de modo que, o no transmitieran la malaria, o se alterara la proporción de sexos en la siguiente generación, o se matara a la siguiente generación de insectos. Existen claras similitudes con las técnicas de esterilización de insectos mediante radiación y por manipulación genética, pero el impulso génico liberaría muchos menos mosquitos, ya que los genes modificados se distribuirían por toda la población en unas cuantas generaciones, contando desde su introducción.

La técnica del impulso génico también es controvertida, puesto que también preocupan sus consecuencias imprevistas. Hasta ahora no se ha aprobado ningún ensayo de campo. Algunos científicos que trabajan sobre el terreno mantienen además que las poblaciones de mosquitos silvestres desarrollarán resistencia al impulso génico (algo que ya ha sucedido en experimentos de laboratorio), lo que, en último término, hará que este método resulte ineficaz. Este tipo de resistencia se podría originar de diversas maneras. En una de ellas, una variación genética natural alteraría las secuencias de ADN cortas que son la diana de los sistemas de impulso génico. O bien, los procesos de reparación celular podrían modificar las secuencias diana del ADN de manera que un sistema de impulso génico dejaría de reconocerlas.

EL PELIGRO DE LA REINTRODUCCIÓN

La eliminación de todos los mosquitos es una quimera. Los distritos de Estados Unidos en los que se ha logrado una reducción más efectiva gastan entre 1 y 10 dólares por persona y año en rociar con insecticidas, así como en la eliminación del agua estancada y de la vegetación que favorece la proliferación de mosquitos, y sin embargo no se han librado completamente de ellos. Matar a todos los mosquitos también podría afectar a las cadenas alimentarias y a la polinización de las plantas de maneras insospechadas. Por otra parte, solo 200 de las 3500 especies de mosquitos pican al ser humano y transmiten enfermedades; sería excesivo suprimirlas a todas. Lo más que cabe esperar es eliminar algunas de las especies clave en zonas específicas, y probablemente es la única opción segura para el medio.

Creo que ese objetivo es factible. En Haití, tal vez podríamos exterminar las principales especies transmisoras de la malaria mediante la técnica de esterilización de los machos, al mismo tiempo que se protege a las personas contra otras especies con los tubos de respiradero y los cebos de azúcar. También habría que vigilar a las personas y a la población local de mosquitos para detectar las primeras señales de amenaza y actuar con contundencia contra cualquier pequeño brote. Con estas estrategias, no es inimaginable que en cinco años se acabara en toda la isla con los parásitos de la malaria.

Pero aún existiría el peligro de la reintroducción. Si un barco con infectados llega a una zona donde no existe la enfermedad —o, peor, con una especie de mosquito que la trae desde África o el sudeste asiático—, esta puede resurgir. Están documentados 68 casos de reaparición de la malaria en poblaciones donde se redujo el control de los mosquitos. *A. aegypti* volvió a cobrar importancia en Brasil en los años ochenta cuando se dejó de rociar con DDT. También resurgieron allí el dengue y la fiebre amarilla, y aparecieron la chikunguña y el zika. Cuando se dejó de rociarlo en India, por escasez del producto y otros factores, volvió la malaria.

Nunca antes ha habido tanta innovación o financiación para el control de los mosquitos. Fundaciones privadas como la nuestra, agencias gubernamentales y la Organización Mundial de la Salud gastan unos 570 millones de dólares al año en investigar la malaria, mientras que en 2002 el gasto anual rondaba los 100 millones. Pero aun con la ayuda de nuevas herramientas, pocas veces habrá soluciones permanentes y la atención habrá de ser constante. IyC

Nota de los editores: La Fundación Bill y Melinda Gates financia varios de los proyectos mencionados, incluidos ciertos aspectos de los tubos de respiradero, los cebos de azúcar y el impulso génico.

PARA SABER MÁS

Sterile insect technique: Principles and practice in area-wide integrated pest management. Dirigido por V. A. Dyck, J. Hendrichs y A. S. Robinson. Springer, 2005.

The deadliest animal in the world. Bill Gates en *Gates Notes*. Publicado en línea el 25 de abril de 2014. **www.gatesnotes.com/Health/Most-Lethal-Animal-Mosquito-Week**

Suppression of a field population of *Aedes aegypti* in Brazil by sustained release of transgenic male mosquitoes. Danilo O. Carvalho en *PLOS Neglected Tropical Diseases*, vol. 9, n.º 7, art. e0003864, 2 de julio de 2015. **http://journals.plos.org/plosntds/article?id=10.1371/journal.pntd.0003864**

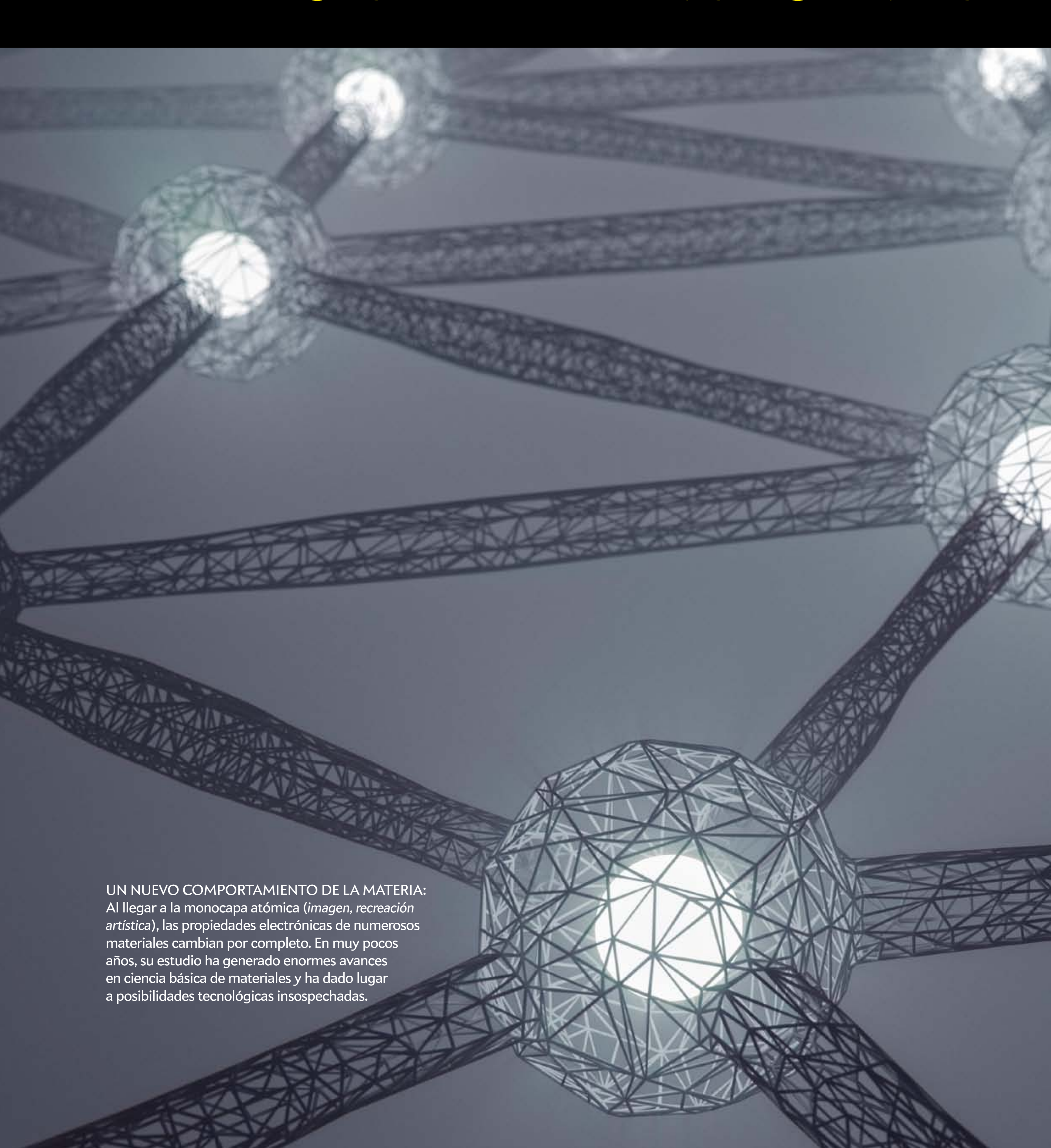
Eave tubes for malaria control in Africa: An introduction. Bart G. J. Knols et al. en *Malaria Journal*, vol. 15, art. 404, 2016. **https://malariajournal.biomedcentral. com/articles/10.1186/s12936-016-1452-x**

EN NUESTRO ARCHIVO

El gen destructor. Bijail P. Trivedi en *IyC*, enero de 2012.

Freno al dengue. Scott O'Neill en *IyC*, agosto de 2015.

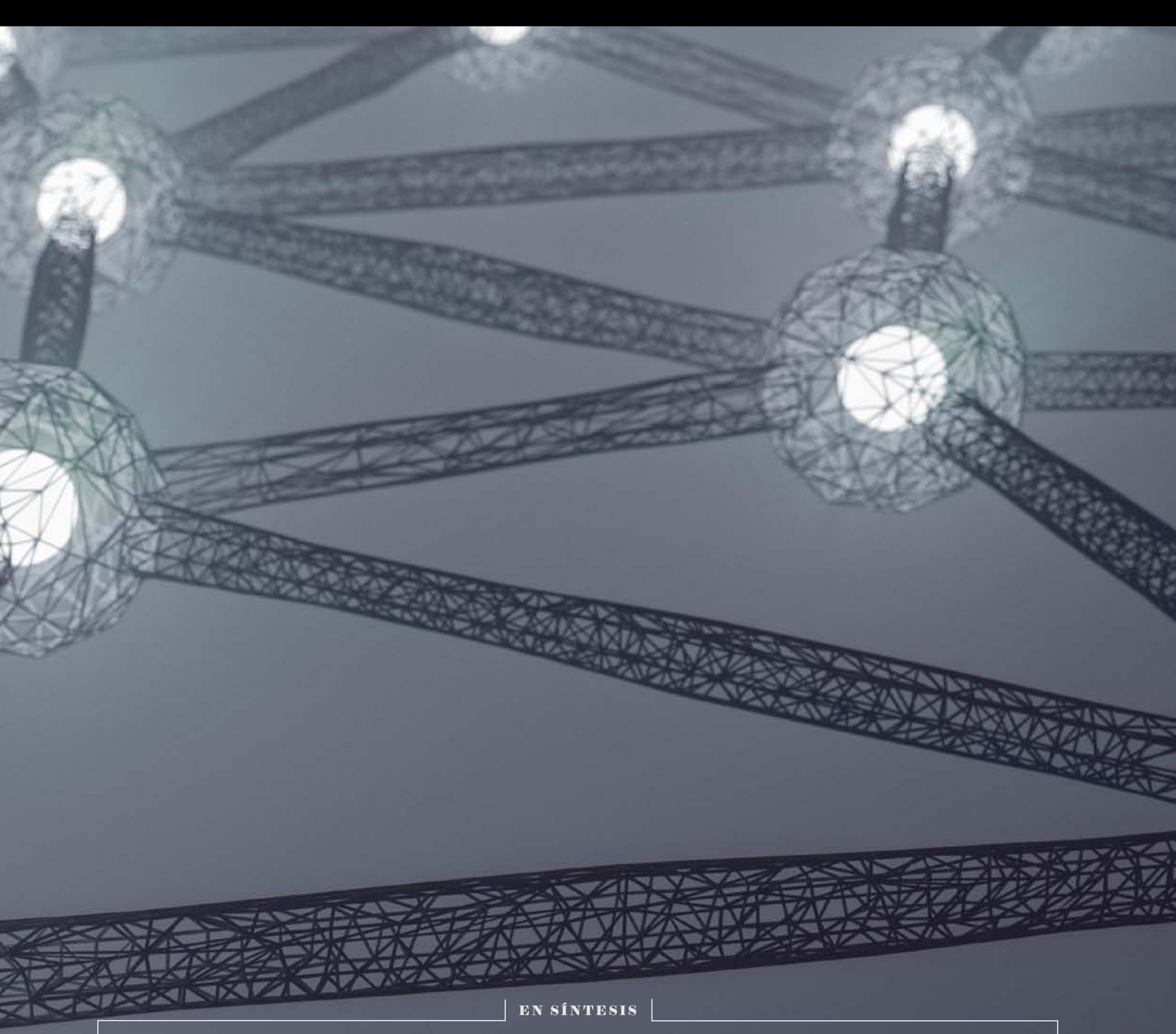
VIAJE A UN UNIVERSO DE DOS DIMENSIONES



UN NUEVO COMPORTAMIENTO DE LA MATERIA: Al llegar a la monocapa atómica (*imagen, recreación artística*), las propiedades electrónicas de numerosos materiales cambian por completo. En muy pocos años, su estudio ha generado enormes avances en ciencia básica de materiales y ha dado lugar a posibilidades tecnológicas insospechadas.

La tabla periódica ofrece numerosas vías para crear materiales de uno o pocos átomos de espesor. Las singulares propiedades de estas estructuras bidimensionales están revolucionando la nanociencia

José J. Baldoví y Ángel Rubio



EN SÍNTESIS

En los últimos años se han descubierto numerosos materiales formados por capas de uno o pocos átomos de espesor. Además del grafeno, destacan otros como el siliceno, el fosforeno o los dicalcogenuros de metales de transición.

Su carácter bidimensional hace que estos materiales exhiban propiedades nunca antes vistas. Su estudio ha dado lugar a una nueva disciplina, a caballo entre la física y la química, la cual se encuentra en plena expansión.

Los científicos siguen explorando qué nuevas opciones ofrece la tabla periódica. Al mismo tiempo, la posibilidad de crear híbridos de varias monocapas está abriendo la puerta a diseñar materiales con propiedades escogidas a voluntad.

José J. Baldoví trabaja como investigador posdoctoral Marie Curie en el Instituto Max Planck de Estructura y Dinámica de la Materia (MPSD), en Hamburgo.

Ángel Rubio es el director del Departamento de Teoría del MPSD, investigador distinguido por el Centro de Física Cuántica Computacional de Nueva York y catedrático de física de materiales de la Universidad del País Vasco.



En 2004, los físicos André K. Geim y Konstantin Novoselov, de la Universidad de Manchester, lograron aislar las primeras láminas de un nuevo material: el grafeno. Este alótropo del carbono, formado por capas de un solo átomo de espesor, se presentaba ante todo el mundo avalado por su extrema flexibilidad, ligereza y resistencia, así como por su excelente capacidad para conducir el calor y la electricidad. Aquel hallazgo, que se vería recompensado pocos años después con la concesión del Nobel, abrió todo un abanico de nuevos horizontes en investigación fundamental y en tecnología.

Las características que hacen único al grafeno se deben en gran parte a su carácter bidimensional. Sin embargo, este no es ni mucho menos el único material con esta propiedad. Más de una década después de su aislamiento, el número de materiales bidimensionales conocidos se ha multiplicado. Cautivados por sus sorprendentes propiedades, cada vez más investigadores exploran todas las posibilidades que ofrece la tabla periódica para diseñar y fabricar materiales de uno o unos pocos átomos de espesor. Son físicos, químicos, expertos en ciencia de materiales e ingenieros electrónicos, que complementan sus esfuerzos desde diferentes partes del mundo para permitirnos soñar con las sociedades del futuro. Sociedades más eficientes que estarán marcadas, entre otros avances, por la revolución nanotecnológica que auguran los materiales 2D.

Desde mediados del siglo pasado, los materiales compuestos por capas apiladas, como el grafito, el nitruro de boro o los dicalcogenuros de metales de transición, han sido objeto de numerosos estudios. Asimismo, los físicos de estado sólido ya habían iniciado el camino hacia la electrónica bidimensional al centrarse en las superficies de contacto entre materiales laminares semiconductores, como el arseniuro de galio y otros. Estas investigaciones habían dado lugar a lo que se conoce como física del gas de electrones bidimensional, así como al interesante efecto Hall cuántico, un fenómeno descubierto en 1980 por Klaus von Klitzing, quien cinco años más tarde recibiría por ello el premio Nobel de física [*véase* «El efecto Hall cuántico», por Klaus von Klitzing; Investigación y Ciencia, mayo de 1986]. Sin embargo, la mecha de lo que hoy llamamos «revolución 2D» prendió en 2004 con el aislamiento del grafeno.

El enorme atractivo de este universo en miniatura reside en que las propiedades de una sustancia pueden cambiar de manera muy drástica con el tamaño. A medida que nos acercamos a la monocapa atómica, las leyes cuánticas dominan la partida y los electrones adquieren un nuevo comportamiento, lo que confiere al material propiedades que jamás habríamos imaginado en el sistema tridimensional. Así, algunos semiconductores, como el grafito de las minas de los lápices, se convierten en semimetales, como el grafeno, mientras que otros adquieren propiedades que los convierten en candidatos óptimos para constituir los dispositivos electrónicos del futuro. Pero, además, las películas de uno o pocos átomos de espesor pueden combinarse entre sí como si de piezas de lego se tratara, lo que expande aún más el abanico de posibilidades.

Aunque el grafeno sigue siendo el material estrella en lo que llevamos de siglo, sus atractivas propiedades han catalizado la aparición —y, en muchos casos, la resurrección— de nuevas familias de nanomateriales basados en sistemas laminares. Ello ha dado lugar a un nuevo campo, a medio camino entre la física y la química, que se encuentra en continua expansión. Hoy contamos con un menú formado por materiales tan variopintos como los dicalcogenuros de metales de transición, caracterizados por sus propiedades semiconductoras, superconductoras e incluso magnéticas; aislantes como el nitruro de boro; haluros metálicos con propiedades ferromagnéticas, y, por último, el grupo de los «xenos» (siliceno, germaneno, estaneno, fosforeno, etcétera), que, al igual que el grafeno, constan de un único elemento y destacan por sus potenciales propiedades topológicas.

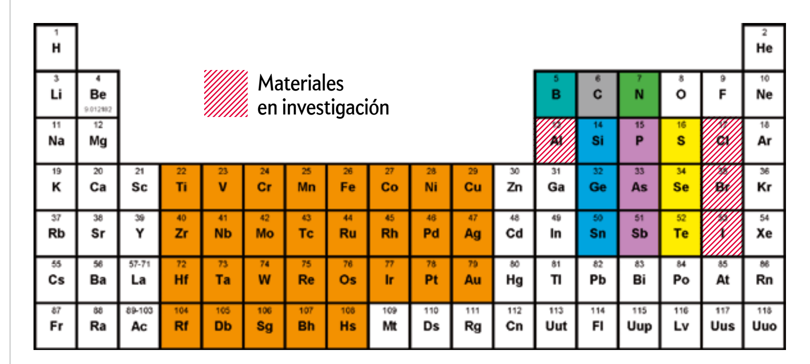
Hacia una nueva electrónica

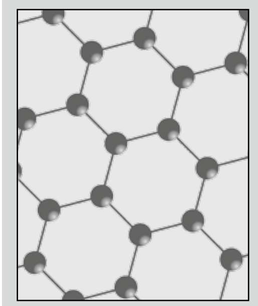
Debido a sus propiedades electrónicas, ópticas, mecánicas, químicas y térmicas, los dicalcogenuros de metales de transición (DMT) habían sido explorados tanto desde el punto de vista teórico como experimental desde finales de los años sesenta del siglo pasado. Ese interés se ha visto rejuvenecido ahora gracias a los avances en fabricación, medición y manipulación a escala nanométrica.

páginas anteriores: © istock/imaginima

La tabla periódica de los materiales 2D

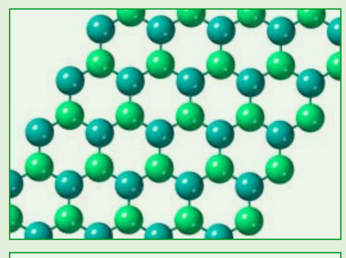
Desde el aislamiento del grafeno, los científicos han conseguido sintetizar decenas de materiales formados por capas de uno o pocos átomos de espesor. El atractivo de estas estructuras bidimensionales se debe a que en ellas los electrones adquieren un nuevo comportamiento, lo que confiere al material propiedades muy distintas de las que ofrece el sistema tridimensional. A continuación se enumeran algunos ejemplos representativos. Las imágenes muestran el aspecto superior, lateral y oblicuo de la monocapa, mientras que los colores indican su origen en la tabla periódica. El sombreado rojo señala otros elementos que hoy se encuentran en el punto de mira de los investigadores para la fabricación de nuevos materiales.

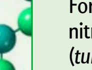


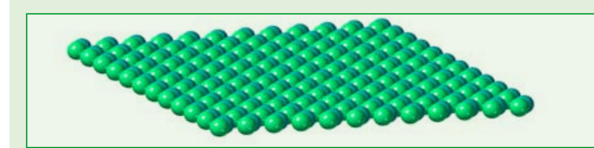


Grafeno

Aislado en 2004, este alótropo del carbono (*gris*) se compone de capas perfectamente planas de un solo átomo de grosor. Se caracteriza por su resistencia, su flexibilidad y sus exóticas propiedades electrónicas.

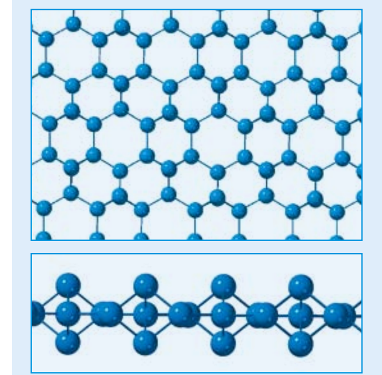


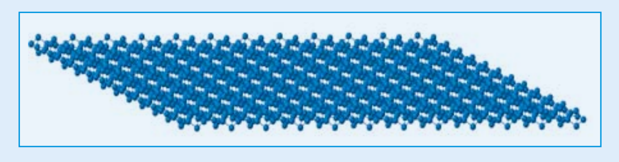




Nitruro de boro

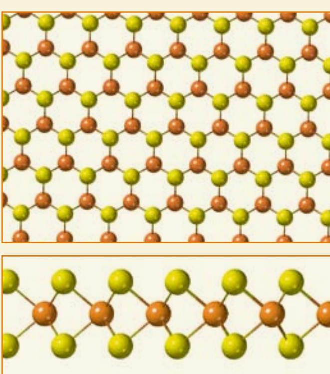
Formado por átomos de nitrógeno (*verde*) y boro (*turquesa*), este material 2D fue sintetizado en 2010. Destaca por sus propiedades como aislante térmico y electrónico. Ello lo convierte en un material óptimo para ser empleado como sustrato o cápsula protectora del grafeno y otros materiales 2D.

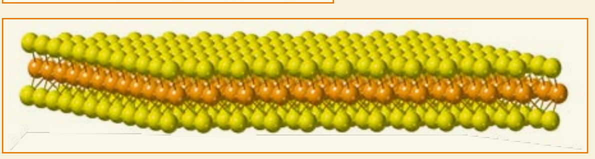




Siliceno

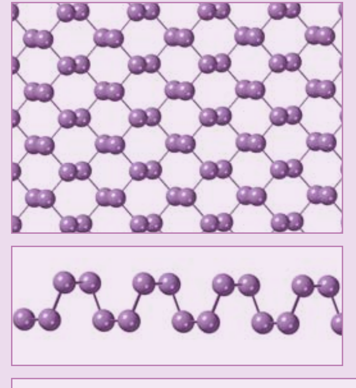
La familia de los «xenos» comprende materiales formados por átomos de un solo tipo, al igual que el grafeno. En el grupo del carbono (*azul*) destaca el siliceno, la forma 2D del silicio. Aislado en 2012, combina la exótica estructura electrónica del grafeno con las propiedades semiconductoras del silicio.

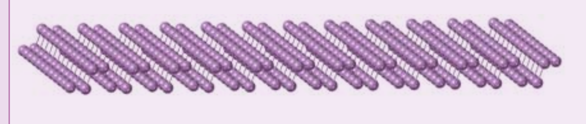




Dicalcogenuros de metales de transición

Constan de una capa de un metal de transición (*naranja*) emparedada entre dos capas de calcógenos (elementos del grupo del oxígeno, *amarillo*). Sintetizados desde 2010 en adelante, destacan por sus propiedades semi- y superconductoras.





Fosforeno

En el grupo del nitrógeno (*lila*), uno de los xenos más estudiados es el fosforeno, la forma bidimensional del fósforo. Aislado por primera vez en 2014, se caracteriza por la alta movilidad de sus cargas. Poco después de su síntesis ya se conseguía fabricar con él un transistor de efecto campo.

CORTESÍA DE LOS AUTORES

A diferencia de la estructura completamente plana del grafeno, las monocapas de DMT están formadas por un plano de átomos de un metal de transición, como molibdeno o wolframio, el cual se encuentra emparedado entre dos capas de calcógenos (elementos del grupo del oxígeno), como azufre o selenio. Los fuertes enlaces covalentes que mantienen unidos a los átomos de una misma capa confieren al material una dureza extraordinaria, mientras que su carácter plano hace que las láminas sean extremadamente flexibles.

En 2010, el mismo año en que Geim y Novoselov recibían el premio Nobel de física, el grupo de Tony F. Heinz, de la Universidad de Columbia, consiguió aislar la primera capa de sulfuro de molibdeno (MoS_2), un material un 50 por ciento más resistente que el acero. Numerosos teóricos habían soñado con la llegada de ese preciso instante. El material, exfoliado mecánicamente, fue estudiado con técnicas espectroscópicas a medida que se iban retirando las sucesivas capas, lo que permitió comprobar que las propiedades dependían del grosor. Lo más destacable fueron las características semiconductoras que aparecían en la lámina aislada, las cuales lo convertían en un candidato idóneo para aplicaciones en electrónica y optoelectrónica, siendo además el primer material 2D emisor de luz.

En general, los DMT combinan la extrema delgadez del grafeno con unas propiedades semiconductoras excepcionales, lo que les confiere enormes posibilidades nanotecnológicas. Para entender por qué, baste recordar que los transistores de los microchips actuales están basados en el carácter semiconductor del silicio, por lo que estos materiales se han colocado en una posición muy ventajosa en la carrera hacia la miniaturización de los componentes electrónicos. De hecho, poco después del aislamiento del MoS_2, Andras Kis, de la Escuela Politécnica Federal de Lausana, y sus colaboradores llevaron a cabo uno de los grandes hitos del nanomundo, al construir el primer transistor de efecto campo basado en un material bidimensional. Aunque las monocapas de MoS_2 presentaban interesantes propiedades semiconductoras, la principal dificultad práctica residía en la baja movilidad de sus electrones. Para solucionarlo, los investigadores emplearon una puerta de óxido de hafnio, lo que aumentó la movilidad de las cargas hasta hacerla equiparable a la observada en películas de silicio o en nanocintas de grafeno.

Otra de las posibilidades que nos ofrecen algunos DMT semiconductores procede de su estructura electrónica; en concreto, de la manipulación de los «valles» asociados a los puntos de más y menos energía de las bandas de valencia y de conducción. Un campo incipiente, bautizado como «valletrónica», propone usar los grados de libertad asociados a estos puntos para codificar y procesar la información; es decir, de un modo similar a como se emplea la carga eléctrica en electrónica o el espín del electrón en espintrónica. Para ello, la idea básica consiste en manipular el flujo de electrones usando luz polarizada circularmente. En 2016, una investigación de nuestro grupo demostró la posibilidad de generar estados fotoexcitados de valle y de espín en muestras de seleniuro de wolframio (WSe_2), un resultado que apuntala la idoneidad de este material y otros similares para construir futuros dispositivos basados en valletrónica y espintrónica.

SUPERCONDUCTIVIDAD EN 2D

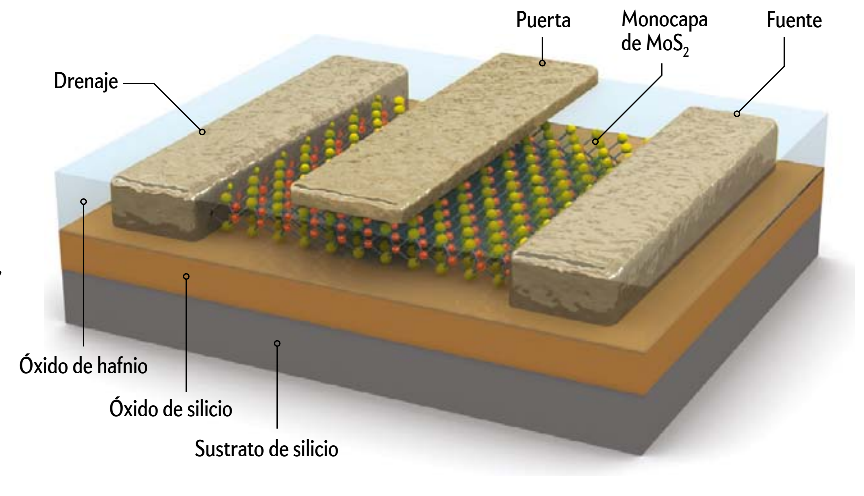
Además de las propiedades semiconductoras, en fecha reciente ha comenzado a estudiarse la superconductividad en algunos DMT bidimensionales. Por definición, una sustancia en estado superconductor conduce la electricidad sin pérdidas de energía. Entre sus aplicaciones se encuentran la fabricación de magnetómetros altamente sensibles, circuitos digitales mucho más rápidos que los tradicionales, potentes electroimanes y medios de transporte sin rozamiento, como los trenes por levitación magnética. En los últimos años, mucho se había especulado sobre la posibilidad de mantener el estado superconductor al bajar de tres a dos dimensiones. Varios trabajos recientes han demostrado la manera de llevarlo a cabo.

APLICACIONES

Transistores 2D

Algunos materiales bidimensionales, como los dicalcogenuros de metales de transición, combinan la delgadez extrema del grafeno con unas excelentes propiedades semiconductoras. Eso los ha colocado en una posición muy ventajosa en la carrera hacia la miniaturización de los componentes electrónicos. En ese sentido superan al mismo grafeno, ya que, por sí solo, este material no puede funcionar como semiconductor.

En 2011, muy poco después del aislamiento del sulfuro de molibdeno (MoS_2), un grupo dirigido por Andras Kis, de la Escuela Politécnica Federal de Lausana, logró construir el primer transistor de efecto campo basado en un material bidimensional. La principal dificultad residía en la baja movilidad de los electrones del MoS_2. Para solucionarlo, los investigadores emplearon una puerta de óxido de hafnio (*esquema*), lo que aumentó la movilidad de las cargas hasta hacerla equiparable a la observada en películas de silicio o en nanocintas de grafeno.



DE: «SINGLE-LAYER MoS_2 TRANSISTORS», B. RADISAVLJEVIC ET AL. EN *NATURE NANOTECHNOLOGY*, VOL. 6, PÁGS. 147-150, MARZO DE 2011

En 2015, un estudio liderado por Miguel Ugeda y Michael Crommie, de la Universidad de California en Berkeley, demostró que era posible la convivencia entre la superconductividad y las ondas de densidad de carga (estados en los que los electrones se comportan como un fluido cuántico ordenado) en una lámina ultrafina de diseleniuro de niobio ($NbSe_2$). Sin embargo, ello exigía disminuir aún más la temperatura a la cual aparecía el fenómeno, la cual pasaba de 7,2 kelvin en el material tridimensional a 1,9 kelvin en la monocapa. Tan solo unos meses después, una investigación liderada por Efrén Navarro-Moratalla y Eugenio Coronado, de la Universidad de Valencia, y Joshua O. Island, de la Universidad Técnica de Delft, lograba aumentar dicha temperatura en el disulfuro de tántalo (TaS_2). Este trabajo ha sido corroborado hace poco por científicos del Instituto de Tecnología de Massachusetts (MIT).

En 2016, dos equipos independientes hallaron una manifestación inusual de la superconductividad en muestras de $NbSe_2$ y MoS_2. Conocida como superconductividad de tipo Ising, esta variante se caracteriza por ser más robusta que la usual, ya que las propiedades superconductoras se mantienen protegidas incluso en presencia de un campo magnético paralelo al plano. Uno de los objetivos que persigue ahora nuestro grupo es aumentar la temperatura crítica de este tipo de superconductores mediante la interacción con la luz. Para ello, estamos centrados en el estudio de los llamados «estados de Floquet». Estos se producen cuando el material se modula con un campo electromagnético externo, el cual saca a los electrones del estado de equilibrio y hace que se combinen con los fotones que llegan a la superficie. Por último, en abril de este mismo año, el grupo de Pablo Jarillo-Herrero, del MIT, descubrió la posibilidad de lograr un estado superconductor en dos láminas de grafeno superpuestas y rotadas 1,1 grados entre sí, lo que ha sido bautizado como «ángulo mágico» por los autores.

Con todo, las promesas de estos materiales no acaban en sus propiedades semi- y superconductoras. Su gran superficie específica les permite adsorber pequeñas moléculas presentes en el entorno, lo que los convierte en candidatos ideales para fabricar sensores de gases contaminantes. Estos dispositivos se basan en los procesos de transferencia de carga que tienen lugar entre las moléculas de gas y el material. Dichos intercambios inducen cambios en la resistencia, los cuales pueden medirse por medio de una corriente eléctrica. En colaboración con investigadores de la Universidad de Oulu, en Finlandia, en los últimos meses nuestro grupo ha estudiado estos procesos en sensores basados en nanohilos de disulfuro de wolframio (WS_2). El desarrollo de este tipo de dispositivos reviste gran importancia para monitorizar los contaminantes presentes en el aire, especialmente en ambientes urbanos.

Por último, otro material emergente es el nitruro de boro (BN) hexagonal, también conocido como «grafeno blanco». La síntesis de películas de BN mediante deposición química en fase de vapor se publicó en 2010, si bien el material se venía estudiando desde hacía décadas. El interés por este prometedor aislante térmico y electrónico radica principalmente en sus posibilidades como sustrato o cápsula protectora del grafeno y otros materiales bidimensionales. El aislamiento que proporciona con respecto al entorno ha posibilitado medir las propiedades y aumentar la vida media de nanodispositivos basados en grafeno.

XENOS

El último grupo en sumarse a la odisea de los materiales 2D ha sido el de los xenos. Al igual que el grafeno, las monocapas de esta familia se encuentran formadas por un solo tipo de átomo, simbolizado por la letra X. Sin embargo, aunque también presentan una estructura hexagonal, los xenos no son completamente planos. Sus átomos contiguos se encuentran plegados en zigzag, formando una especie de cresta ondulada. Ello se debe en parte a las mayores distancias de enlace entre los átomos, las cuales impiden que se dispongan en un plano.

En esta nueva familia destaca la investigación sobre el siliceno, la forma bidimensional del silicio. El interés que suscita este material para liderar la revolución de los microcomponentes tecnológicos resulta obvio, ya que combina la exótica estructura electrónica del grafeno con todo lo que ya sabemos sobre los dispositivos basados en silicio. Sin embargo, aún es necesario superar su inestabilidad al ser expuesto al aire.

Las primeras investigaciones teóricas sobre la estructura atómica y electrónica del siliceno datan de 1994. Aquellos cálculos ya predijeron el característico zigzag de sus átomos, así como la aparición de un «cono de Dirac» (la singular configuración energética que muestran los electrones en el grafeno). Once años después, un equipo de investigadores franceses, españoles e italianos logró hacer crecer nanohilos de silicio (es decir, una estructura unidimensional) sobre una superficie de plata, lo que aportó el primer indicio experimental de la existencia del siliceno. Posteriormente, en 2012, las primeras capas fueron obtenidas por el grupo de Noriaki Takagi, de la Universidad de Tokio. Para ello los investigadores usaron como sustrato una superficie de plata y, más tarde, una de iridio. Eso hizo posible observar la estructura de bandas del material. Un estudio de nuestro grupo puso el foco en este sistema y logró determinar que el origen de dicha estructura se debía a la fuerte interacción de las dos capas en contacto, lo que demostraba que sus propiedades eran complejas y dependían en gran medida de las condiciones de crecimiento empleadas en el experimento.

En 2015, un trabajo liderado por Alessandro Molle y Deji Akinwande, de la Universidad of Texas en Austin, consiguió construir el primer transistor de efecto campo basado en siliceno y capaz de operar a temperatura ambiente. La estrategia que emplearon los investigadores fue muy ingeniosa. En primer lugar, hicieron crecer la monocapa sobre plata para, acto seguido, recubrirla con una capa ultrafina de óxido de aluminio. Después dieron la vuelta al material y lo emplazaron sobre un sustrato de dióxido de silicio. Con el siliceno completamente encapsulado, retiraron la parte central de la película de plata (ahora en la parte superior del dispositivo) y obtuvieron una tira de siliceno en contacto con dos nanoelectrodos de plata.

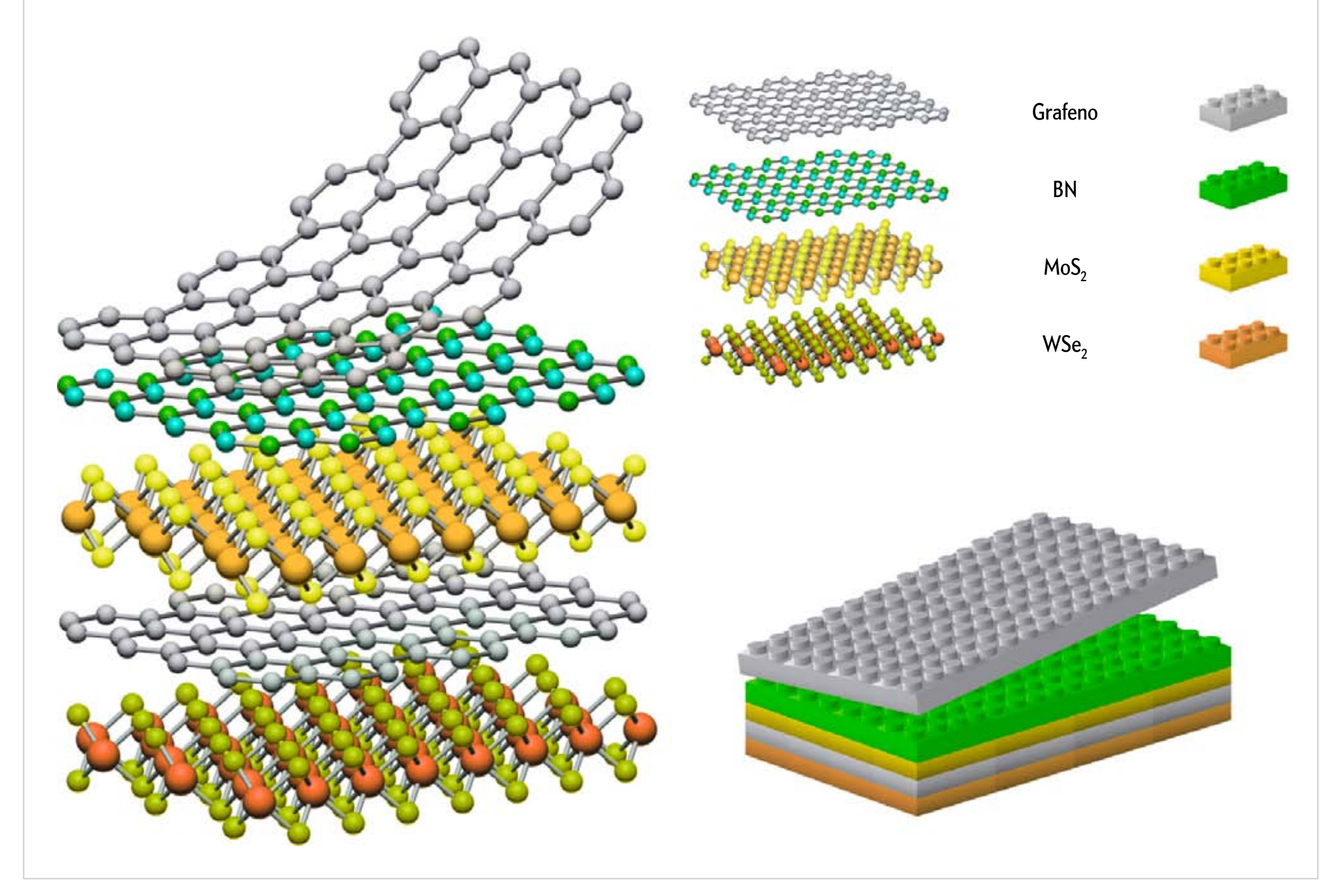
Además de la estructura en zigzag descrita, conocida como «patrón de flores», el siliceno exhibe una segunda configuración, la cual fue revelada por nuestro grupo en 2014. En ella, los átomos de silicio se organizan en forma de mancuerna sobre la red hexagonal. En el mismo trabajo elaboramos un modelo de crecimiento en el que se pasaba gradualmente de la primera a la segunda configuración. Poco después, demostramos que a partir de esta última podían obtenerse dos nuevas fases laminares termodinámicamente estables. Dichas fases, conocidas como silicitos, exhiben propiedades semiconductoras de gran interés para aplicaciones fotovoltaicas, ya que presentan una gran capacidad para absorber luz en el espectro visible. En el mismo trabajo propusimos los mecanismos a escala atómica para el crecimiento de siliceno y silicitos en multicapa.

Después del siliceno, el interés de la comunidad se centró en las formas bidimensionales del germanio y el estaño, ambos también del grupo del carbono. La estructura del germaneno

Lego atómico

Una de las principales ventajas que ofrecen los materiales 2D es la posibilidad de combinarlos, como si de piezas de lego se tratara, con el objetivo de crear nuevos materiales con propiedades elegidas a voluntad. Debido al tipo de fuerzas que mantienen unidas a las distintas capas, estos nanoedificios reciben el nombre de heteroestructuras de Van der Waals.

En 2012, un trabajo liderado por André Geim, Konstantin Novoselov y Leonid Ponomarenko, de la Universidad de Manchester, mostró cómo construir dispositivos verticales con capas de seleniuro de wolframio (WSe_2), sulfuro de molibdeno (MoS_2), nitruro de boro (BN) y grafeno (*esquema*). Poco después ya era posible combinar docenas de monocapas. Hoy, esta línea de investigación constituye una de las áreas más activas de la nanociencia. Sus aplicaciones abarcan desde la electrónica y la fabricación de dispositivos fotovoltaicos hasta el control de las propiedades superconductoras de un material.



había sido propuesta teóricamente junto con la del siliceno en 1994, mientras que la del estaneno no fue explorada hasta 2013. En ambos casos, los modos de vibración se preveían más suaves que en el carbono o en el silicio, por lo que se esperaba que los nuevos materiales fuesen más estables. Sin embargo, pronto se vio que resultaban más vulnerables a la hora de formar agregados en tres dimensiones, y que su formación solo era posible sobre determinados sustratos. El éxito llegó en 2014, cuando se evaporaron átomos de germanio para depositarlos sobre una superficie de oro.

Nuestras investigaciones, en colaboración con María Eugenia Dávila, del Instituto de Ciencia de Materiales de Madrid, y Guy Le Lay, de la Universidad de Aix-Marsella, permitieron revelar la estructura del germaneno. En los últimos años, varios trabajos han considerado la alta movilidad de sus cargas, sus propiedades ópticas y su carácter de aislante topológico en 2D a temperatura ambiente, así como sus posibilidades como superconductor y como componente para la industria electrónica. Por su parte, el estaneno fue preparado en 2015 sobre un sustrato de telururo de bismuto (Bi_2Te_3). A partir de primeros principios, nuestro grupo fue capaz de resolver su estructura, formada asimismo por unidades con forma de mancuerna. También mostramos que, al igual que el siliceno y el germaneno, el estaneno constituía un aislante topológico bidimensional cuyas propiedades podían ajustarse aplicando tensión mecánica.

En los últimos años, la familia de los xenos ha conseguido extenderse más allá del grupo del carbono. Uno de los materiales de este tipo más estudiados es el fosforeno, el cual procede de la forma alótropa más estable del fósforo, conocida como fósforo negro. Sus monocapas presentan propiedades semiconductoras y sus átomos se disponen según la típica estructura hexagonal, si bien aquellos contiguos se posicionan en zigzag. En 2014, varios grupos experimentales lograron aislarlo por primera vez; poco después, ya se lograba fabricar el primer transistor de efecto campo basado en fosforeno. La alta movilidad de sus cargas ha estimulado aún más la investigación sobre este material.

Entre sus posibles áreas de aplicación podemos mencionar la optoelectrónica, así como su uso en células fotovoltaicas, cámaras de visión nocturna infrarroja, fibra óptica para telecomunicaciones, etcétera. Para ello, sin embargo, será necesario superar sus problemas de estabilidad en contacto con el aire y diseñar mecanismos que permitan su fabricación a gran escala. En el mismo grupo que el fósforo son también prometedoras las monocapas de arsenio, antimonio y bismuto, las cuales han sido exploradas más recientemente.

Por último, en cuanto a los nanomateriales basados en los elementos del grupo III, en 2015 se logró aislar el borofeno. El material resultante comparte la estructura cristalina hexagonal del grafeno, con la diferencia de que posee un átomo extra, el cual se localiza en el centro del hexágono. Esta configuración favorece el tipo de enlaces de tres átomos que forma el boro. A diferencia del elemento de partida, cuya conductividad eléctrica es deficiente, el borofeno presenta un marcado carácter metálico. La mayor afinidad química del boro hace que las muestras se oxiden con facilidad, por lo que deben recubrirse con otros materiales. Sin embargo, esta reactividad puede suponer una clara ventaja de cara al futuro, ya que permite ajustar sus propiedades usando elementos de otros grupos químicos u otros materiales que actúen como cápsula protectora. Entre sus posibles aplicaciones, el borofeno podría actuar como ánodo en baterías de litio y sodio, así como resultar de utilidad en la fabricación de dispositivos flexibles y fotovoltaicos. Por otro lado, hoy los investigadores trabajan en la obtención de alumineno, para el que los cálculos teóricos disponibles han predicho una conductividad eléctrica superior a la del grafeno y el borofeno. Una vez más, lo mejor parece estar por llegar.

MATERIALES A LA CARTA

Uno de los campos más prometedores en nanociencia es el desarrollo de nuevos materiales que se caractericen no solo por la combinación de diferentes funcionalidades, sino también por la simbiosis entre sus diferentes componentes. Como hemos visto, los materiales 2D nos ofrecen un amplísimo abanico de posibilidades, y muchos de ellos son estables en condiciones ambientales. La pregunta ahora es: ¿cómo sacarles el máximo partido? La respuesta parece simple: combinando lo mejor de cada uno de ellos; es decir, diseñando y fabricando materiales a la carta. La idea básica consiste en tomar una monocapa de un material 2D y recubrirla con sucesivas láminas de materiales diferentes, como si de piezas de lego se tratara, hasta conseguir las propiedades deseadas. En estos nanoedificios, las relativamente débiles fuerzas de Van der Waals entre las distintas capas actúan como «pegamento» del conjunto, por lo que se conocen como heteroestructuras de Van der Waals.

Aunque todavía estamos lejos de poder construir materiales perfectos a voluntad, los primeros avances exitosos en esta dirección se han venido produciendo desde 2010. La mayoría de los estudios pioneros se centraban en combinar grafeno con nitruro de boro a fin de demostrar las posibilidades que ofrecía este último como sustrato de alta calidad o como cápsula protectora. El siguiente paso importante llegó en 2012 gracias a un trabajo liderado por Geim, Novoselov y Leonid Ponomarenko, también de la Universidad de Manchester, donde los investigadores mostraron cómo desarrollar dispositivos verticales con capas de BN, MoS_2, WSe_2 y grafeno. Poco después ya era posible combinar docenas de monocapas. Teniendo en cuenta la cantidad de materiales 2D disponibles y los que todavía quedan por descubrir, las posibilidades de ensamblaje parecen infinitas, con prometedoras perspectivas en física y ciencia de materiales, así como en aplicaciones industriales, si bien para ello el ensamblaje debe ser posible a gran escala.

Otra particularidad de las heteroestructuras bidimensionales es que también dan cabida a los sistemas moleculares que nos ofrece la química. En los últimos años se han publicado varios ejemplos de materiales híbridos que permiten ajustar las propiedades de la superficie, o bien usar el material bidimensional para modificar las propiedades de las moléculas o átomos depositados sobre él. También pueden ponerse en contacto materiales 2D con sistemas unidimensionales, como nanotubos de carbono, o semiconductores 3D, como silicio o germanio. Ello ha dado lugar a aplicaciones para dispositivos lógicos, fotodetectores, fotovoltaicos y emisores de luz.

En un contexto similar, una línea de investigación de nuestro grupo para los próximos dos años estará canalizada a través del proyecto Marie Curie SuperSpinHyMol («Modelización de superconductividad y efectos de espín en híbridos de moléculas y materiales 2D»), financiado por la Comisión Europea. Mediante técnicas computacionales, exploraremos el montaje de una serie de moléculas o átomos magnéticos sobre la superficie de un superconductor 2D para aprovechar los estados exóticos que se forman en la interfaz. Dichos estados podrían funcionar a modo de vehículo para transmitir la información entre esos diminutos imanes de forma instantánea. Otra alternativa contemplaría el uso de materiales magnéticos 2D, como el yoduro de cromo (CrI_3), que fue aislado el año pasado por el grupo de Jarillo-Herrero, depositados directamente sobre monocapas de TaS_2 o $NbSe_2$. Un paso más en la complejidad de este tipo de sistemas incorporaría un tipo especial de nanoimanes cuyas propiedades pueden ajustarse al irradiarlos con luz. Tales moléculas pueden cambiar su estado magnético, lo que se conoce como transición de espín, por lo que funcionarían como un interruptor capaz de alterar a voluntad las propiedades superconductoras de la superficie.

Aunque en este fascinante viaje al universo de los materiales bidimensionales apenas hemos izado las velas, ya estamos vislumbrando todo un nuevo mundo por explorar. Nos esperan todo tipo de sorpresas, tanto en lo referente a la síntesis como a su control a escala nanométrica. Desde el aislamiento de las primeras capas de grafeno hemos avanzado mucho en el desarrollo del lego bidimensional, pero lo que queda por descubrir es inimaginable. IyC

PARA SABER MÁS

2D materials and van der Waals heterostructures. Konstantin S. Novoselov et al. en *Science*, vol. 353, n.º 6298, aac9439, julio de 2016.
Emergent elemental two-dimensional materials beyond graphene. Yuanbo Zhang, Ángel Rubio y Guy Le Lay en *Journal of Physics D: Applied Physics*, vol. 50, n.º 5, art. 053004, febrero de 2017.
2D materials beyond graphene. VV. AA. en *Nature Materials*, vol. 16 (edición especial), febrero de 2017.

EN NUESTRO ARCHIVO

Grafeno. André K. Geim y Philip Kim en *IyC*, junio de 2008.
Electrónica del grafeno. José González Carmona, M.ª Ángeles Hernández Vozmediano y Francisco Guinea en *IyC*, septiembre de 2010.
Lego a escala atómica. André K. Geim en *IyC*, febrero de 2015.
Bienvenidos a Planilandia. Vincenzo Palermo y Francesco Bonaccorso en *IyC*, junio de 2017.

por Francisco Javier Murcia, David Verdiell Cubedo y Domingo Lloris

La plasticidad de los góbidos

La elevada diversidad de estrategias de vida de estos peces les confiere una gran capacidad de adaptación a distintos ambientes acuáticos

Los gobios, o góbidos, están presentes en toda la geografía marina del mundo, desde zonas muy someras, con escasos centímetros de profundidad, hasta los 400 metros. También pueden encontrarse en aguas salobres de marismas y estuarios, en aguas hipersalinas de ciertas lagunas costeras, e incluso en aguas dulces. Su talla suele ser reducida: oscila desde unos pocos milímetros, como en *Speleogobius trigloides*, hasta un máximo de 30 centímetros, como en *Gobius cobitis*.

El número de especies catalogadas varía entre 1771 y 1950, en función de la fuente consultada. Según nuestros estudios, en el mar Mediterráneo se han registrado poco más de 50, la mayoría de las cuales son endémicas de dicho mar. Entre ellas cabe mencionar las pequeñas especies del género *Pomatoschistus*, como el gobio de Quagga (*P. quagga*) y el gobio de Kner (*P. knerii*), y también otras especies más difíciles de observar, como el gobio de Miller (*Milleriogobius macrocephalus*) o el gobio cavernícola (*Corcyrogobius liechtensteini*).

La gran diversidad de especies es un indicador del éxito biológico de esta familia de peces, sustentado por su enorme capacidad adaptativa. Esta se manifiesta en distintos rasgos morfológicos, anatómicos, fisiológicos y conductuales que les permiten colonizar una enorme variedad de ambientes. Hemos constatado así que son muy tolerantes a variaciones en la salinidad y la temperatura y, además, pueden nutrirse de muy diversos alimentos.

Asimismo, resulta destacable su variada estrategia reproductiva. Son ovovivíparos y generalmente gonocóricos (con sexos en individuos separados), pero también hay especies hermafroditas bidireccionales (sexo alternativo), como ocurre en el género *Trimma*. Algunas especies abandonan las puestas a su suerte (formas pelágicas dotadas de vejiga gaseosa), pero la mayoría realiza la puesta en el sustrato del fondo, aprovechando cualquier concavidad de una roca o de una valva de molusco, o depositando los huevos piriformes en una superficie lisa, donde el macho los cuida y oxigena hasta su eclosión. Todos esos factores contribuyen a mantener su plasticidad y capacidad de expansión y colonización de nuevos hábitats.

—Francisco Javier Murcia
Redactor de aQua *y fotógrafo submarino*
—David Verdiell Cubedo
Instituto de Ecología Acuática, Universidad de Gerona
—Domingo Lloris
Exinvestigador del Instituto de Ciencias del Mar, Barcelona



LOS GÓBIDOS son muy territoriales, sobre todo en la época de reproducción, como se muestra en este enfrentamiento entre dos machos de *Gobius geniporus*.



UNO DE LOS GÓBIDOS MÁS RAROS y pequeños del Mediterráneo es el gobio cavernícola (*Corcyrogobius liechtensteini*), de 25 milímetros de longitud. Es una especie que vive cerca de cuevas y concavidades.



EL GOBIO ANÉMONA (*Gobius buchichii*) es endémico del Mediterráneo. Puede vivir en el interior de la ortiga de mar (*Anemonia viridis*) gracias a una secreción mucosa de su piel que le protege de las células urticantes de esta.



LA DIETA DE LOS GÓBIDOS varía mucho de una especie a otra: consumen invertebrados, pequeños peces o incluso los hay que son herbívoros estrictos. En la imagen se aprecia un ejemplar de *Gobius roulei* alimentándose de un pequeño gobio del género *Pomatoschistus*.

EN LA MAYORÍA de las especies de gobios son los machos, como este ejemplar de *Gobius cobitis*, los que cuidan de la puesta hasta el momento de su eclosión.

por Alfredo Marcos



Alfredo Marcos es catedrático de filosofía de la ciencia de la Universidad de Valladolid.

¿Qué entendemos por información?

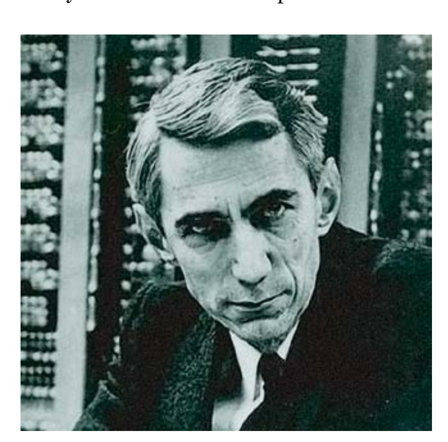
Una guía filosófica para intentar clarificar uno de los conceptos más transversales de la ciencia actual

Una de las tareas clásicas de la filosofía de la ciencia consiste en clarificar conceptos, especialmente aquellos que son transversales; es decir, que aparecen en distintas disciplinas. La filosofía puede conservar una mirada más amplia que la exigible a cada una de las especialidades, lo que le permite captar las conexiones entre los diferentes usos científicos de una misma idea. Y, si existe un concepto transversal en las ciencias de nuestros días, ese es sin duda el de información. Este aparece en casi todas las materias científicas, desde las matemáticas y la lógica hasta las ciencias sociales y humanas, pasando por las ciencias de lo natural y de lo artificial. Comencemos considerando algunos ejemplos.

La teoría clásica de la información de Claude E. Shannon y Warren Weaver es una teoría general, conectada en muchos sentidos con las teorías matemáticas de la probabilidad. Según algunas interpretaciones, en física cuántica el estado de un sistema depende de la información que sobre él tenga el observador, como ejemplifica el famoso experimento mental del gato de Schrödinger. También parece que, de algún modo, la información se comparte entre partículas muy alejadas entre sí, como muestra el fenómeno del entrelazamiento cuántico. En el ámbito de la termodinámica, se viene insinuando desde hace tiempo la existencia de una correlación negativa entre la entropía y la información de un sistema.

En el terreno de la biología, el lenguaje informacional lo invade todo. Hablamos de información genética, de códigos y de mensajes genéticos, de información sensorial, de procesamiento cerebral de la información, de transmisión de información entre neuronas, de acumulación de información en el sistema inmunitario, etcétera. Por su parte, el ecólogo Ramón Margalef nos hizo ver la enorme importancia del concepto de información a la hora de teorizar sobre la dinámica de los ecosistemas. Charles Seife, de la Universidad de Nueva York, ha llegado a escribir en su libro *Descodificando el universo* (Ellago, 2009) que los seres vivos no son sino máquinas de procesamiento de información. Según esta perspectiva, todo proceso biológico implica transferencia, procesamiento o almacenamiento de información. Es lo que se ha denominado «equivalencia bioinformacional».

Ni que decir tiene que el concepto de información resulta central en informática y ciencias de la computación. Tampoco las ciencias humanas y sociales han querido prescindir de él. Los sociólogos teorizan sobre la sociedad de la información, donde su distribución marca las relaciones y las dinámicas sociales, y el concepto no está menos presente en ciencias de la comunicación. Para analizar el periodismo y el resto de los modos de comunicación social, la idea de información parece imprescindible.



CLAUDE SHANNON (1916-2001)

Los ejemplos podrían multiplicarse a voluntad, pero esta pequeña muestra basta para comprobar que el concepto de información medra en multitud de ciencias bajo diversas modalidades. Podemos pedir, pues, a la filosofía que se interese por dicho concepto y que contribuya a su clarificación. En la estela de esta demanda, nace todo un campo que el filósofo de Oxford Luciano Floridi ha denominado «filosofía de la información».

Aun así, a pesar del valioso trabajo que ya se está haciendo, el concepto de información está resultando ser tan ubicuo como problemático. En esta tesitura, la primera tentación consiste en atribuir equivocidad a la palabra *información*. Es decir, quizá no haya a la postre ninguna conexión entre lo que entiende por información el físico cuántico y lo que entienden el informático, el genetista o el comunicólogo. Usan una misma grafía, pero tal vez con significados inconexos, como quien llama *gato* al animal y al artefacto elevador. Tomar esta puerta de salida, no obstante, puede ser precipitado, ya que nuestra intuición insiste en indicarnos que los distintos usos científicos del concepto guardan algo en común.

Por otro lado, cuando aparece la computación cuántica, queremos que la información del físico y la del informático se conecten de algún modo. Algo análogo deberíamos decir con respecto a la biocomputación. Y cuando el politólogo afirma que la información es poder, sabemos que, hoy, una buena dosis de poder deriva del manejo de la información genética. Campos aparentemente tan distantes como la genética y la politología se encuentran en este punto, y no quisiéramos que su relación se basase en un equívoco. Por supuesto, el lector puede imaginar otros muchos ámbitos de solapamiento entre disciplinas en los que está implicado el concepto de información.

Elementos comunes

Veamos, pues, si podemos acotar un cierto núcleo semántico común a todos los usos científicos de la noción de información. Según algunos autores, deberíamos entender la información, junto con la materia y la energía, como uno de los componentes básicos de la realidad: como una sustancia primitiva, no reducible a ninguna otra

y que interviene en la composición y el funcionamiento del universo. El filósofo estadounidense Fred Dretske comenzaba su libro *Conocimiento y flujo de la información* (Salvat, 1989) con una frase que es toda una declaración en este sentido: «En el principio fue la información».

No obstante, la propuesta de considerar la información al mismo nivel que la materia o la energía adolece de una desventaja. Incumple el principio de simplicidad, que en filosofía suele denominarse navaja de Occam. Si no tuviésemos más remedio, habría que acudir a esta ampliación ontológica y aceptar la información como un componente básico de la realidad. Pero, antes de llegar a ese punto, convendría explorar otras propuestas más simples.

El libro clásico de Shannon y Weaver, *Teoría matemática de la comunicación* (Forja, 1981), nos ofrece alguna pista. Según Weaver, existen tres niveles de problemas referidos a la información. En primer lugar tenemos los problemas técnicos, o sintácticos, referidos a la máxima cantidad de información que puede transmitir un mensaje en función de su estructura. En segundo lugar están los problemas semánticos, que atañen al significado y a la verdad de los mensajes. Por último, existen los problemas pragmáticos, que afectan a la eficacia para cambiar comportamientos o estados de las cosas.

Más recientemente, Floridi ha establecido la siguiente distinción: información *como* realidad, información *sobre* la realidad e información *para* la realidad. Es tentador proyectar esta distinción de Floridi sobre los niveles de problemas identificados por Weaver.

Así, en el nivel sintáctico miramos el mensaje *como* una realidad en sí; es decir, estudiamos su estructura. Podemos buscar la mejor configuración posible de un mensaje en morse o de un fragmento de ADN para que logre comunicar la mayor cantidad de información. Según Weaver, la teoría de Shannon pretende cubrir solo los problemas de este primer nivel. En el segundo, el semántico, exploramos lo que nos dice un mensaje *sobre* algún otro aspecto de la realidad. Nos preguntamos por el significado del mensaje en morse o por el aminoácido concreto al que corresponde un fragmento de ARN mensajero (ARNm). En el tercero, los problemas tratan sobre la capacidad del mensaje *para* modificar la realidad. El mensaje en morse que recibimos puede cambiar nuestro conocimiento y nuestro comportamiento, y algo análogo sucede con el ribosoma que recibe un fragmento de ARNm e incorpora un determinado aminoácido en la proteína que está sintetizando.

En el nivel sintáctico, vemos la información como una propiedad de ciertas entidades a las que llamamos mensajes. Cuando decimos que el ADN contiene información, no queremos decir que tenga algo más que sus componentes atómicos, sino que, dada su composición y estructura, tiene una cierta propiedad: es capaz de informar. Algo similar ocurre cuando decimos que hay información en un disco duro. No es que haya algo más que materia y energía, sino que les atribuimos una propiedad (como el color o el tamaño) que llamamos información.

Este modo de concebir la información resulta muy útil, por ejemplo, a la hora de intentar cuantificarla en unidades como los bits. No obstante, puede parecer incompleto, pues la información constituye un fenómeno transitivo, intencional, por decirlo en jerga filosófica: es siempre información acerca de algo, algo normalmente distinto al propio mensaje. El ARNm informa sobre una proteína; la frase en morse lo hace sobre las cotizaciones en la Bolsa de Bombay.

La información como relación

Estos problemas pueden encauzarse tomando la información, no como una propiedad del mensaje, sino como una relación diádica entre el mensaje y aquello a lo que este refiere. Nos encontramos ya en el plano semántico. Aquí la información ya no se entiende como una propiedad de algo, sino como una relación diádica entre el mensaje y cierta parte de la realidad sobre la cual el mensaje informa.

Ahora bien, esta noción sigue pareciendo incompleta. Nos falta una pieza: a saber, el receptor. El material genético es informativamente inerte fuera del ambiente celular adecuado. Simplificando mucho las cosas, podríamos decir que nuestro fragmento de ARNm informa sobre la composición de una proteína a un ribosoma que ejerce como receptor. También se puede entender que la frase en morse informa a mi vecino sobre la Bolsa de Bombay, pero no resulta informativa para mí, que desconozco el código. Tampoco es muy útil un disco duro sin algún artefacto capaz de leerlo. Luego, ¿dónde está la información? ¿En el ADN, en el epigenoma, en el citoplasma o en el entorno? ¿En el disco o en el computador? ¿En la frase o en el lector?

Ahora vemos la información como una relación triádica, tal y como sugirió en su día el filósofo estadounidense Charles S. Peirce. De este modo, la información sería una relación entre un mensaje, un receptor y un sistema de referencia.

Quizá sea este el concepto de información más comprensivo, al que se pueden remitir todos los demás. Diríamos que hay relación informacional si —y en la medida en que— un mensaje produce un cambio en el «conocimiento» que tenía el receptor sobre el sistema de referencia. Lamentablemente, aquí tendremos que dejar «conocimiento» entre comillas. Es cierto que la conexión entre el concepto de información y otros cercanos (como conocimiento, forma, entropía, significado, orden, organización o complejidad) también necesita clarificación, pero eso ha de ser trabajo para otra jornada.

Al tomar la información como una relación triádica, tal vez resulte factible la integración de los diferentes usos científicos del concepto e incluso lleguemos a clarificar su relación con otros cercanos, pues la mayor parte de los problemas conceptuales relativos a la información ocurren por elipsis. A menudo se habla de la información de un mensaje sin mencionar el receptor ni el sistema de referencia. Se toma un elemento de la relación informacional, pero se olvida explicitar los otros dos. Dicho de otro modo, la información no está ubicada en el mensaje, en receptor ni en el sistema de referencia, sino que consiste, precisamente, en una cierta relación entre ellos. IyC

PARA SABER MÁS

Teoría matemática de la comunicación. Claude Shannon y Warren Weaver. Editorial Forja, 1981.
Philosophy of information. Pieter Adriaans y Johan van Benthem. North Holland, 2007.
Information and living systems: Philosophical and scientific perspectives. Dirigido por George Terzis y Robert Arp. The MIT Press, 2011.
The philosophy of information. Luciano Floridi. Oxford University Press, 2011.
Information in the biological sciences. Alfredo Marcos y Robert Arp en *The philosophy of biology: A companion for educators*, dirigido por Kostas Kampourakis. Springer, 2013.

EN NUESTRO ARCHIVO

Información y significado. Peter J. Denning y Tim Bell en *IyC*, junio de 2013.
Hacia una teoría universal. Jérôme Segal en *IyC*, junio de 2013.

por Pablo A. Zambrano

Pablo A. Zambrano Lobos es investigador doctoral de la Facultad de Ciencias Químicas de la Universidad de Concepción, en Chile. Estudia la interacción de diferentes moléculas con membranas celulares y modelos moleculares.



Lindau: un encuentro de inspiración para jóvenes científicos

A la reunión anual asisten cada vez más investigadores de Sudamérica

La primera semana del verano europeo se celebraba en Lindau, en Alemania, una de las reuniones científicas más prestigiosas del año: el 68.º Encuentro de Laureados con el Premio Nobel. Como joven investigador invitado a la reunión, viajé más de 12.000 kilómetros desde Lebu, mi ciudad natal en el sur de Chile, hasta esta hermosa y apacible ciudad al pie del lago Constanza. Durante siete días la atención se fijaría en los galardonados, con quienes jóvenes científicos de todo el mundo tendríamos la oportunidad de hablar y compartir ideas.

Desde sus inicios en 1951, estos encuentros fomentan el intercambio de ideas, las conexiones entre investigadores, el entusiasmo por la ciencia, la inspiración y la excelencia.

La última reunión estuvo dedicada a la fisiología y la medicina y a ella asistieron 39 premios nóbel y más de 600 jóvenes científicos de diferentes países y culturas seleccionados bajo un riguroso proceso en el que se valoraba la excelencia, la productividad y la motivación de los candidatos. Mi experiencia e investigación doctoral, supervisada por el profesor Mario Suwalsky y dedicada a estudiar cómo diferentes moléculas y fármacos empleados para tratar la enfermedad de Alzheimer interaccionan con las membranas celulares, convenció al comité de selección.

Durante el encuentro se debatió sobre algunos de los grandes descubrimientos que merecieron el premio Nobel, así como los importantes desafíos a los que se enfrenta la ciencia actual. Se abordaron temas punteros de investigación en los campos de la biología molecular, la genética, la inmunología y la neurociencia, y también se trataron aspectos como el futuro de la medicina personalizada y los problemas relacionados con políticas de publicación en revistas científicas.

La programación de la reunión fue excelente. Las conferencias magistrales de los premios nóbel fueron seguidas de pequeños espacios de interacción entre los jóvenes científicos y los laureados. La reunión comenzó con un maravilloso viaje hacia los fundamentos del reloj biológico. Michael Rosbash y Michael Young, ambos galardonados con el premio Nobel de medicina y fisiología en 2017, presentaron detalles de sus investigaciones sobre el ritmo circadiano y su vital importancia en la fisiología animal. En una sesión de las *Agora talks* (pequeñas presentaciones de un laureado seguidas de una larga ronda de preguntas y comentarios), Dan Shechtmann, premio nóbel de química en 2011, entusiasmó a la audiencia al presentar los fundamentos físicos que crean los hermosos y coloridos patrones de las alas de los lepidópteros.



MICHAEL LEVITT, galardonado con el Nobel de química en 2014, debate con jóvenes participantes en la reunión de Lindau.

Me fascinó especialmente la conferencia de Edvard Moser, premio nóbel de medicina y fisiología en 2014, en la que detalló el descubrimiento de las células cerebrales involucradas en el proceso de ubicación espacial y en la que también presentó nuevos hallazgos sobre la codificación del tiempo en el cerebro, lo que tiene importantes consecuencias para nuestra comprensión de la memoria. Por su parte, Ada Yonath, premio nóbel de química en 2009, expuso novedosos resultados sobre estructuras recientes de ribosomas de bacterias patógenas multirresistentes que son relevantes para el diseño eficaz de nuevos y óptimos antibióticos.

Definitivamente, los encuentros de Lindau ofrecen una increíble oportunidad a todos los jóvenes científicos de compartir y conocer, en primera persona, las experiencias, detalles y sentimientos propios de descubrimientos que han cambiado la manera de ver el mundo.

La participación en esta reunión de jóvenes talentosos provenientes de Sudamérica ha ido creciendo poco a poco. Desde sus inicios, la reunión ha acogido a más de 20 chilenos de diferentes campos y disciplinas. La presencia de países latinoamericanos en este tipo de eventos tan prestigiosos sin duda puede convertirse en una gran oportunidad para crear redes y colaboraciones científicas importantes.

Todas las conferencias y las ocasiones de conversación, unidas a la multiculturalidad de los participantes, le dieron a la reunión un cariz especial. El principal mensaje que nos llevamos los que asistimos a ella fue la necesidad de mantener la curiosidad y las ganas por descubrir algo nuevo. Recibir inspiración y motivación para atreverse a hacer frente a problemas científicos desafiantes y mantener la pasión por la ciencia son unos de los principales regalos que nos ha brindado esta experiencia. IyC

JULIA NIMKE/LINDAU NOBEL LAUREATE MEETINGS

CONSERVACIÓN

COMERCIO DE MASCOTAS EXÓTICAS



De la caída de la biodiversidad tiene bastante más culpa el comercio de animales silvestres, cazados con fines ornamentales, que la misma destrucción del hábitat

Richard Conniff



EN EL MERCADO de animales ornamentales y de compañía de Jatinegara en Yakarta, se venden grillos en cañas de bambú (*centro de la imagen*) y gran número de aves y animales capturados ilegalmente.

Richard Conniff es divulgador científico, premiado por sus artículos, que colabora con el *New York Times* como columnista de opinión. Entre sus obras se cuentan *House of lost worlds* (Yale University Press, 2016) y *The species seekers* (W.W. Norton, 2010).







David S. Wilcove, experto en biología de la conservación, adscrito a la Universidad de Princeton, se hallaba en campaña de avistamiento de aves por la isla de Sumatra en 2012, cuando se percató de que no había casa de los pueblos por donde pasaba de la que no colgaran jaulas con las aves silvestres que esperaba contemplar en la selva. Una quinta parte de los hogares de Indonesia tiene aves por animales de compañía. «¿Qué impacto produce esto en la avifauna?», se preguntó.

Para averiguarlo, Wilcove se desvió del itinerario trazado para visitar el mercado de aves y mamíferos de Pramuka de Yakarta, un abigarrado bazar de fauna silvestre del sudeste de Asia donde podemos comprar desde murciélagos hasta monos. Repartido en cientos de puntos de venta, cada uno con centenares de ejemplares, «predominaban los ejemplares en condiciones lastimosas, con síntomas de enfermedad, el plumaje deslucido y raído, apáticos o alborotados porque muchos pertenecen a especies silvestres que no se habitúan a vivir enjauladas», recuerda. Algunos pertenecían a tipos que ni siquiera los zoológicos dotados de profesionales cualificados consiguen mantener en cautividad y que, sin duda, morirían poco después de la compra.

La investigación emprendida por Wilcove y sus colaboradores acabó vinculando la demanda de aves de compañía en el mercado de Indonesia al declive de las poblaciones en su medio natural. En un estudio aparecido en 2015 en *Biological Conservation*, planteaban que las tarifas del mercado podrían servir de chivato de alarma que indicaría el declive de una especie, incluso años antes de que la investigación lo detectara, y eso con suerte: cuando la cotización media de un shama malabar (*Kittacincla malabarica*), una especie apreciada en las competiciones de aves de canto de Indonesia, se disparó un 1500 por ciento entre 2013 y 2015, el cambio alertó a los conservacionistas de que estaba desapareciendo de su hábitat natural.

En los trabajos de campo por Bert Harris, uno de los autores del estudio de 2015 ahora en la Rainforest Trust de Virginia, no se halló ni rastro del shama malabar, ni siquiera en los hábitats aparentemente intactos donde solía medrar, como los bosques alejados unos cinco kilómetros de los caminos más cercanos. Los compradores pagaban sumas elevadas por las vulnerables variedades insulares, muchas ahora reconocidas como especies por derecho propio y valoradas por los coleccionistas en razón de sus atributos novedosos, como pueden ser una cola larga o un canto peculiar. El comercio de animales ornamentales «puede condenar una especie a la extinción, aunque disponga del hábitat apropiado, y hacerlo sin que nadie se percate», advierte Wilcove.

El problema no solo afecta a las aves, ni se limita a Indonesia o a otros países en vías de desarrollo. El comercio de fauna se alimenta de la demanda de los coleccionistas de EE.UU. y Europa. Un ejemplo: los acuarios estadounidenses constituyen el destino de cerca de 11 millones de peces, amén de otros animales marinos, que se extraen de los arrecifes de coral cada año. Los mayoristas de EE.UU. importan cada año una media de 225 millones de animales vivos. En los primeros 14 años de nuestro siglo, el total superó los 3000 millones, según un reciente estudio publicado en *EcoHealth*. A pesar de la creencia generalizada de que nuestro amor por los animales de compañía constituye una de las virtudes

EN SÍNTESIS

Los conservacionistas consideran desde hace décadas que la destrucción del hábitat es la mayor amenaza para la biodiversidad.

Pero el comercio de animales exóticos se ha erigido en uno de los principales responsables de la desaparición de la vida silvestre en el planeta.

El grueso de la demanda proviene de los aficionados y coleccionistas de EE.UU. y Europa.

PÁGINAS ANTERIORES: MARK LEONG, REDUX PICTURES; EN ESTA PÁGINA: ALAMY (*loris*); GETTY IMAGES (*loros*)





LA FAUNA SILVESTRE es recolectada por millones como parte del comercio y del tráfico de animales exóticos. Los ejemplares suelen venderse de forma ilegal en mercados locales o enviarse fraudulentamente a países lejanos. Muchos mueren en el camino a causa de las pésimas condiciones.

BULLIT MARQUEZ, AP PHOTO (*serpientes*); SUBHENDU SARKAR, GETTY IMAGES (*aves enjauladas*)

más nobles de la naturaleza humana, los expertos reconocen que se ha convertido en uno de los principales culpables de lo que denominan desfaunación, la desaparición masiva de la fauna en hábitats de todo tipo, un fenómeno generalizado.

MÁS ALLÁ DE LA PÉRDIDA DEL HÁBITAT

Desde hace decenios, los conservacionistas vienen atribuyendo a la destrucción de los ecosistemas la pérdida de biodiversidad. Pero el boyante comercio surgido en torno a la fauna, con la captura de un número cada vez mayor de especies para satisfacer una demanda internacional, ha provocado un estado de alarma creciente. «La tesis de que la destrucción del hábitat es la principal amenaza para la supervivencia de las especies comienza a ponerse en tela de juicio», afirma Crawford Allan, de la red de vigilancia del comercio de fauna TRAFFIC, consorcio establecido entre el Fondo Mundial para la Naturaleza (WWF) y la Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza (IUCN). «Hay especies que disponen de todo el hábitat que precisan, pero se están sacando de su medio natural a un ritmo inquietante.»

La demanda de especies raras ha convertido el comercio de animales en una fuente de preocupación para los conservacionistas. La Lista Roja de Especies Amenazadas de la UICN incluye ya muchas especies abocadas a la extinción por su captura con tales fines, entre ellas aves (el estornino de Bali y el sudamericano guacamayo de Spix), un primate (el loris perezoso, *Nycticebus coucang*, del sudeste asiático), peces ornamentales (el barbo torpedo, *Sahyadria denisonii*, de Asia) y reptiles (las tortugas malgache y estrellada de Madagascar, *Astrochelys yniphora* y *A. radiata*, respectivamente). Y esas son solo las mejor estudiadas, advierten Wilcove y Harris. Para la inmensa mayoría de los vertebrados expuestos a la venta, ni siquiera se ha comenzado a evaluar de qué modo afecta su comercio a las poblaciones silvestres.

Los estudios de campo que pretenden dar respuesta a esas incógnitas avanzan con una parsimonia inevitable, frente a un mercado que puede moverse con una rapidez impredecible y devastadora. En cierto caso notorio de los años noventa, los investigadores publicaron la primera descripción científica de la tortuga cuellilarga de McCord (*Chelodina mccordi*), aportando los datos habituales relativos a la localización, en la isla de Roti, al sur de Indonesia. Los coleccionistas se abalanzaron con avidez sobre el nuevo hallazgo y ahora se halla en peligro crítico. Con esta dolorosa lección aprendida, los biólogos omitieron la ubicación exacta de la víbora cornuda de Matilda, en las tierras altas del sur de Tanzania, cuando describieron la especie en 2011. Aun así, aquel mismo año los mayoristas se las ingeniaron para ofertarla a más de 500 dólares el ejemplar, según un estudio de 2016 sobre el comercio de reptiles en Europa, publicado en *Biological Conservation*.

Los intermediarios y los coleccionistas justifican la venta de los ejemplares capturados con el pretexto de la conservación. Dicen mantener poblaciones de seguridad, o aducen que puesto que se está destruyendo su hábitat, son ellos los que se preocupan de la protección de las especies en cuestión. En la inmensa mayoría de los casos, ello no es cierto, sino que es el propio comercio el que está diezmando las poblaciones.

Por ejemplo, la tortuga malgache (*A. yniphora*), de vistoso caparazón abombado de tonos dorados, solo sobrevive ya en el Parque Nacional de la Bahía de Baly, en el noroeste de Madagascar. Su explotación comercial está prohibida desde 1975 por el Convenio sobre el Comercio Internacional de Especies Amenazadas de Fauna y Flora Silvestre (CITES). Los conservacionistas han trabajado durante décadas para mantener sus efectivos en libertad en unos 600 a 800 individuos. Pero, en el último lustro, el repunte del furtivismo, del que se abastecen los coleccionistas, ha reducido su censo en la Bahía de Baly a menos de 100 adultos. En Tailandia, Indonesia y China, países que suelen respetar las normas del CITES sobre el papel pero no en la práctica, los especuladores han catapultado el precio por un ejemplar maduro de esta tortuga hasta los 100.000 dólares.

La especulación financiera parece ser también el motivo por el que en 2015 un empresario chino desembolsó más de 200.000 dólares por un galápago de cuello rojo (*Mauremys nigricans*), quelonio originario de China meridional que ahora se cree extinguido en libertad. «Cuanto más raro es el animal, cuanto más próximo a la extinción se halla, más fomentan los traficantes su venta y más sube su cotización», asegura Rick Hudson, herpetólogo y presidente de la Turtle Survival Alliance, una organización sin ánimo de lucro con sede en Texas.

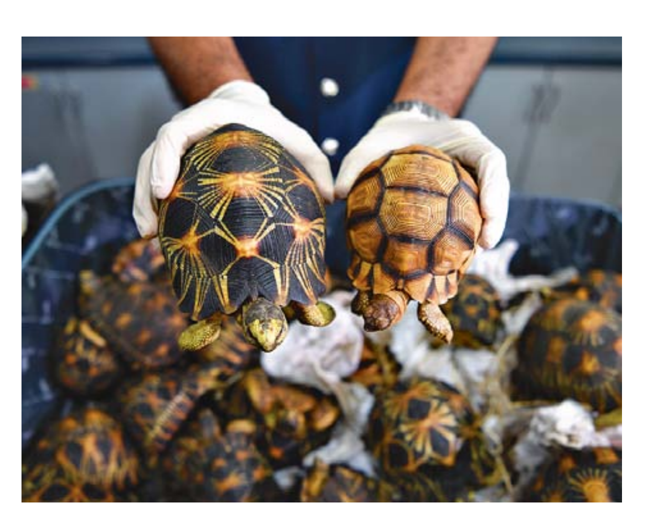
Los mismos que alimentan el tráfico de órganos y otras partes de animales —desde los cuernos de rinoceronte hasta las pieles de cocodrilo— están promoviendo el tráfico de animales ornamentales. «Muchos de los responsables del tráfico

vinculado con los remedios de la medicina tradicional están diversificando sus actividades ante el auge espectacular que ha experimentado el comercio de las mascotas de lujo en China», afirma Brian Horne, herpetólogo de la Sociedad para la Conservación de la Vida Silvestre (WCS).

Las bandas criminales y los delincuentes se han sumado al negocio. Asaltan los propios centros de cría en cautividad creados por las organizaciones conservacionistas para la repoblación del medio. El año pasado, los ladrones irrumpieron en una de esas instalaciones de Tailandia, donde se cobraron un botín de seis tortugas malgaches y 72 estrelladas. Los coleccionistas privados tampoco escapan a sus fechorías. Ese mismo año, en Hong Kong, sustrajeron 23 tortugas en peligro de extinción, valoradas en unos 116.000 dólares.

Detener y condenar a las personas que trafican con ejemplares ilegales es una medida obligada para frenar el expolio. En 2016, un juez condenó a un ciudadano de Pensilvania a dos años de cárcel por organizar una red de exportación ilegal de galápagos grabados (*Glyptemys insculpta*), un quelonio amenazado. Según los investigadores federales, John Tokosh, entonces de 54 años, capturó 750 ejemplares en una zona restringida del sur de Pittsburgh, las inmovilizó con cinta adhesiva para su expedición y las vendió por 400 dólares cada una a traficantes de animales en Hong Kong.

Pero la enorme escala del comercio de animales de compañía vivos, dentro y fuera del país, desborda sin remedio a los inspectores portuarios encargados de descubrir el contrabando. «Hacemos muchos registros, pero es como buscar una aguja en un pajar», afirma uno de los inspectores del Servicio de Fauna y Pesca de EE.UU. «Disponemos de todas las herramientas. Tenemos más equipo y más personal. Contamos con una excelente unidad de información. Pero da la impresión de que siempre vamos a la zaga. Para cuando lo descubrimos, todo se ha esfumado.» En cierta ocasión, un traficante logró introducir en el país un orangután rapándole el pelaje, tiñéndolo de marrón y mezclándolo con una remesa legal de otro primate.



TORTUGAS amenazadas de Madagascar incautadas a los traficantes por agentes de aduanas en Malasia.

La vasta diversidad de especies con las que se trafica y se comercia limita las posibilidades de que sean descubiertas. «No hay nadie que sepa identificar todas las aves», explica Eric Goode, fundador de la ONG neoyorquina Turtle Conservancy. «En cuanto a los peces tropicales, a menos que cuentes con el mejor ictiólogo del mundo, no hay modo de identificar todas las especies. En el caso de las tortugas, solo existen 340 especies en el planeta», pero los inspectores «no suelen distinguir entre una tortuga estrellada birmana (*Geochelone platynota*) y otra india (*G. elegans*), ni siquiera entre un galápago conchiblando y otro.»

¿CAPTURA O CRÍA?

Goode y otros sostienen que, si el comercio de animales se preocupara de la conservación, los proveedores dejarían de capturar especímenes silvestres y dedicarían mayores esfuerzos a la cría en cautividad. «Llega un momento en que hay que ponerse manos a la obra. Detengamos de una vez la importación de fauna salvaje. Acabemos con la importación de aves silvestres. Dejemos de traer tortugas de Horsfield», una especie originaria de Asia central que es habitual en las tiendas de animales de Estados Unidos.

La cría en cautividad podría ser la respuesta al tráfico de aves en Indonesia, donde muchos hogares ya tienen inseparables (*Agapornis*) de esa procedencia, asegura Wilcove. Un programa destinado a fomentar la compra de periquitos, canarios y otras especies domésticas podría convencer a la gente de que no «necesita tener un shama o comprar una de esas aves que no soporta vivir enjaulada». Cuando era niño, recuerda, solía usar una grabación del «Pavarotti de los canarios» para enseñar al suyo a cantar. «No hay ninguna razón por la que los canarios no se puedan convertir en competidores temibles» en los concursos de canto de Indonesia, declara.

Pero la cría en cautividad podría ser más difícil de lo que se supone. En 2014 EcoHealth Alliance, otra ONG neoyorquina, creó su página web, EcoHealthy Pets, inspirada en el Seafood Watch del Acuario de la bahía de Monterrey, para asesorar a los consumidores sobre las elecciones más acertadas y más desaconsejables a la hora de adquirir un animal exótico. La lista destaca la cría en cautividad como el modo de reducir tanto los riesgos sanitarios como la presión sobre la naturaleza. Pero la falta de apoyo económico ha limitado hasta el momento la lista a solo 52 especies, insuficientes para satisfacer ni siquiera al aficionado novato.

El sector de los animales de compañía y ornamentales mantiene una actitud ambivalente en torno al compromiso con la cría en cautividad, en parte porque nadie sabe cómo reproducir muchas de las especies más comunes. Y en aquellos casos en que se descubre, puede suceder que la crianza hasta la madurez sexual sea mucho más cara que la mera captura. Cuando los criadores del comercio de peces de acuario marinos descubrieron cómo criar el espléndido gobio mandarín (*Synchiropus splendidus*), por ejemplo, Scott Fellman, un minorista acuariófilo, se quejaba en un foro virtual de que «el aficionado corriente no querrá pagar 40 dólares por un ejemplar criado si puede conseguir por 12 otro capturado».

Para complicar más las cosas, muchos supuestos centros de cría se proveen, en realidad, de ejemplares en libertad; enmascaran el expolio sistemático del hábitat natural. Piénsese en la cantidad de cálaos papúes (*Rhyticeros plicatus*), presuntamente criados en cautividad, que se exportan: «supera con creces la que los criadores pueden suministrar, habida cuenta del lento ritmo de reproducción de esta ave», afirmaba en 2016, en *Global Ecology and Conservation*, Laura Tensen, genetista de la Universidad de Johannesburgo. De modo similar, numerosas especies de ranas y camaleones no parecen prestarse a programas de cría que sean económicamente rentables por su baja tasa de reproducción en

MANAN VATSYAYANA, GETTY IMAGES

COMERCIO LETAL

El coste de la rareza

Volumen comercial histórico
Variación del volumen comercial (porcentaje)

La demanda de aves en los mercados indonesios de animales de compañía está mermando los efectivos de esas especies, con un impacto incierto de esta práctica. El seguimiento de las poblaciones naturales con el fin de detectar su declive a través de estudios de campo tiene un coste prohibitivo. Pero en una investigación, David S. Wilcove, de la Universidad de Princeton, y sus colaboradores comprobaron que las cotizaciones del mercado permitían detectar las especies en riesgo por una parte de ese coste. El alza del precio y el descenso en el volumen de ventas puede indicar si determinada especie se halla en apuros en la naturaleza.

Poblaciones estables o al alza
Capuchino punteado
Cimitarra dorsicastaña
Capuchino de cabeza pálida
Estornino bronceado

Poblaciones en grave declive
Shama oriental
Bulbul gorjirrojo
Shama malabar
Bulbul cabeciamarillo

La población asiática del shama malabar ha experimentado un fuerte descenso a consecuencia de su comercio

El bulbul cabeciamarillo se considera amenazado en todas partes

–500 0 500 1000 1500 2000
Variación del precio (porcentaje)

FUENTE: «USING MARKET DATA AND EXPERT OPINION TO IDENTIFY OVEREXPLOITED SPECIES IN THE WILD BIRD TRADE», POR J. BERTON C. HARRIS ET AL., EN *BIOLOGICAL CONSERVATION*, VOL. 187, JULIO DE 2015; AMANDA MONTAÑEZ (*gráfica*)

tales condiciones y, por eso, Tensen subraya, «son capturadas por miles con la etiqueta fraudulenta de cría en cautividad».

No siempre la cría es lo más sensato, sin embargo. Cuando los herpetólogos Daniel Natusch y Jessica Lyons acometieron una investigación meticulosa sobre el comercio de la pitón arborícola verde (*Morelia viridis*), originaria de Indonesia, que se suponía criada enteramente en cautividad, descubrieron que muchos establecimientos desconocían la manera de criarlas; algunos ni siquiera disponían de las instalaciones adecuadas. Calcularon que el 80 por ciento de las serpientes exportadas habían sido capturadas en la naturaleza. Con todo, ese comercio de ejemplares capturados parece ser sostenible, posibilitado por su abundancia.

En tales casos, afirma Natusch, el comercio de especímenes capturados podría ser, de cara a la conservación, preferible a la cría: «Se puede incentivar a los lugareños para que protejan el hábitat. Si los recolectan de modo sostenible, obtendrán ingresos de la selva y no se verán obligados a talarla».

Natusch, que trabaja como asesor para la IUCN, reconoce que los exportadores pueden cometer atrocidades, como embutir serpientes en maletas o en botellas de gaseosa para pasarlas ilegalmente por las aduanas. También reconoce que capturar ofidios que solo habitan en islas o lugares remotos pone en riesgo su supervivencia. Pero el problema de la cría en cautividad, señala, es que «una vez que sacas de la naturaleza a esos animales, disocias por completo» el comercio de cualquier motivo razonable para preservar su hábitat. No obstante, comenta, el comercio ilegal de pitones verdes procedentes del archipiélago indonesio de Raja Ampat ha hecho que los isleños quieran mantener intactas sus selvas. (Una rara variedad de color amarillo hace especialmente lucrativo el comercio de ese ofidio.)

LA OFERTA Y LA DEMANDA

Los coleccionistas de animales singulares suelen estar convencidos de que están haciendo algo maravilloso por ellos, pues los rescatan de su medio y los protegen de la inanición, la depredación y demás peligros naturales, declara Tom P. Moorhouse, de la Universidad de Oxford y autor principal de un estudio acerca de las actitudes de los consumidores hacia los animales exóticos, publicado en 2017 en *Conservation Letters*. Comenta que los compradores suelen suponer que «sus deberes éticos han sido cumplidos antes de que el animal quede expuesto a la venta.» Pero no es así. «Necesitamos campañas que convenzan a la gente de que eso no se cumple y de que sus preferencias tienen un impacto enorme. Si no hubiera demanda, no existiría mercado para los ejemplares exóticos capturados», añade Moorhouse.

El sector aún no ha alcanzado el consenso sobre cómo está afectando el comercio a las poblaciones silvestres. Aun así, existe preocupación por la conservación, insiste Mike Bober, presidente de una entidad asesora de ese sector comercial. «Creemos que hay cabida tanto para los capturados como para los criados en cautividad en la mayoría de esas comunidades —lo importante son los métodos de captura», afirma. «Si se cazan de forma sostenible, sobre todo cuando esa actividad corre a cargo de autóctonos cuyo sustento depende de ello, no hay nada que objetar.»

Pero los ecosistemas saludables son cada vez más escasos en la era de la civilización y no existen normas que rijan la captura sostenible. Tarde o temprano los amantes de los animales y los comerciantes tendrán que afrontar la realidad y diseñar mejores métodos de caza en un mundo donde se esquilman, de forma creciente, bosques, selvas, mares y otros hábitats. IyC

PARA SABER MÁS

Wildlife laundering through breeding farms: Illegal harvest, population declines and a means of regulating the trade of green pythons (*Morelia viridis*) from Indonesia. Jessica A. Lyons et al. en *Biological Conservation*, vol. 144, n.º 12, págs. 3073-3081, diciembre de 2011.
Defaunation in the Anthropocene. Rodolfo Dirzo et al. en *Science*, vol. 345, págs. 401-406, 25 de julio de 2014.
Using market data and expert opinion to identify overexploited species in the wild bird trade. J. Berton C. Harris et al. en *Biological Conservation*, vol. 187, págs. 51-60, julio de 2015.
Under what circumstances can wildlife farming benefit species conservation? Laura Tensen en *Global Ecology and Conservation*, vol. 6, págs. 286-298, abril de 2016.
Do not publish. David Lindenmayer y Ben Scheele en *Science*, vol. 356, págs. 800-801, 26 de mayo de 2017.
Information could reduce consumer demand for exotic pets. Tom P. Moorhouse et al. en *Conservation Letters*, vol. 10, n.º 3, págs. 337-345. mayo-junio de 2017.



EN MAYO DE 1980, la colosal erupción del monte Santa Elena, en la costa noroccidental de EE.UU., hizo que saltarán por los aires 400 metros de su cumbre. Perdieron la vida 57 personas.

GEOLOGÍA

LA PRÓXIMA GRAN EX



PLOSIÓN

LAS ENTRAÑAS DEL MONTE SANTA ELENA OFRECEN UNA NUEVA PERSPECTIVA SOBRE EL FUNCIONAMIENTO INTERNO DE LOS VOLCANES. EL HALLAZGO DA IMPORTANTES CLAVES PARA LA PREDICCIÓN DE ERUPCIONES CATASTRÓFICAS

Steve Olson



Steve Olson es escritor residente en Seattle y autor del libro *Eruption: The untold story of Mount St. Helens* (W.W. Norton, 2016).

En la madrugada del 18 de mayo de 1980, la fotógrafa Arlene Edwards, acompañada de su hija Jolene, subía a un promontorio rocoso del suroeste del estado de Washington y plantaba allí su cámara para observar el monte Santa Elena, 16 kilómetros al sureste. Llevaba dos meses emitiendo ceniza y vapor. Decenas de espectadores lo miraban desde las crestas circundantes. Creían hallarse a una distancia segura.

De pronto, el flanco norte del Santa Elena se desplomó hacia el valle. Del hueco surgió una furiosa nube gris de roca pulverizada y gas caliente. Se expandió de forma explosiva, llenó el cielo del este y voló hacia Arlene y su hija. Arlene salió despedida a 300 metros de distancia; hallarían su cuerpo enredado en las ramas de un falso abeto. El de Jolene, asfixiada por la ceniza, se encontró cerca de la camioneta de su madre. Otras 55 personas murieron o quedaron heridas de muerte alrededor de la montaña.

Casi 40 años después, a unos centenares de metros de donde fallecieron aquellas mujeres, Carl Ulberg, estudiante de sismología de la Universidad de Washington, se arrodilla entre la vegetación boscosa que rebrota. Frente a él tiene una gran nevera de plástico medio enterrada, con la tapa salpicada de tierra como si fuera una trampilla de acceso al subsuelo. Extiende la mano hacia una maraña de dispositivos electrónicos y cables y extrae una tarjeta de memoria. A lo lejos reluce el monte Santa Elena; el magma enfriado de sus erupciones más recientes, entre 2004 y 2008, rellena parte del cráter. Ulberg guarda en una funda de plástico la tarjeta, con seis meses de datos de vibraciones bajo la montaña, e inserta una nueva. «Así es como vamos a averiguar lo que ocurre ahí debajo», dice.

En los últimos tres años, esta estación sísmica y otras 69 alrededor del Santa Elena han registrado sacudidas de explosivos enterrados, temblores de terremotos y el leve susurro de las olas en costas lejanas. Se integran en el proyecto Toma de Imágenes del Magma bajo el Monte Santa Elena, o iMUSH, que sigue el rastro de la roca fundida desde el interior de la Tierra hasta la superficie. Se trata de uno de los intentos más exhaustivos de obtener imágenes del sistema de conductos bajo un volcán, y ha permitido descubrir un mundo subterráneo nunca antes visto. La idea tradicional de un volcán era simple: una cámara que almacena magma en profundidad y un fino conducto que comunica con la superficie. Pero bajo el Santa Elena la roca fundida atraviesa una serie de reservorios interconectados, donde experimenta cambios químicos que pueden derivar en erupciones más energicas. El magma que alimenta el volcán se desplaza tanto en horizontal como en vertical, y se abre paso sorteando obstáculos y aprovechando las fallas preexistentes. Su movimiento da lugar a terremotos, profundos y superficiales, que presagian futuras erupciones a medida que se recargue la cámara magmática situada bajo el volcán.

Esos y otros hallazgos son de interés no solo para los millones de personas que viven en las inmediaciones del Santa Elena y la cordillera de las Cascadas, sino también para quienes viven cerca de otros volcanes. Desde 1980, más de 25.000 personas en todo el mundo han perdido la vida por su causa: una cifra que revela la necesidad de mejorar la predicción del riesgo. Como el Santa Elena, la mayoría de los volcanes continentales se alzan en placas de la corteza terrestre que colisionan entre sí y dejan que el calor interno de la Tierra alcance la superficie. Uno de los objetivos de iMUSH consiste en aplicar sus hallazgos a otros volcanes, aun si parecen muy diferentes.

VER A TRAVÉS DE LAS ROCAS

Las perforaciones más profundas ahondan solo unos 13 kilómetros, pero las raíces de un volcán llegan mucho más abajo. Imaginemos una torre de perforación que alcance la profundidad que deseemos junto al monte Santa Elena. En los 70 primeros kilómetros hallaríamos las típicas rocas continentales. Pero entonces ocurriría algo asombroso: llegaríamos a rocas oceánicas empapadas de agua que todavía contendrían vida marina fosilizada.

Se trata de una pequeña placa tectónica, un fragmento del suelo oceánico del noreste del Pacífico que se introduce bajo el borde de Norteamérica. Subducciones como esta son el principal motor del vulcanismo terrestre. Cuando un segmento de corteza oceánica desciende bajo una placa continental, se calienta y genera en la corteza suprayacente magmas que se infiltran hacia la superficie. La placa que se introduce por debajo de Norteamérica no solo ha creado la alineación de volcanes que

EN SÍNTESIS

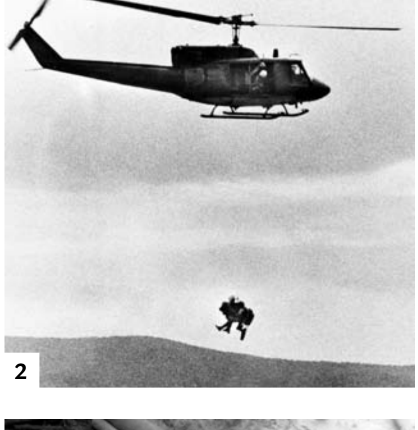
Una cadena de volcanes que recorre la costa oeste de EE.UU. amenaza a millones de personas. De ellos, el monte Santa Elena es el más mortífero y el de peor fama.

Nuevos métodos para investigar el interior de la montaña muestran las sorprendentes maneras en que la roca fundida se desplaza desde las profundidades y pasa por intrincados conductos.

Las señales asociadas a los movimientos y los cambios químicos de los magmas quizá ayuden a predecir las erupciones del Santa Elena y otros volcanes similares, así como su peligro.

PÁGINAS PRECEDENTES: DIANE COOK Y LEN JENSHEL ARCHIVO DE *NATIONAL GEOGRAPHIC*







CATÁSTROFE: La gran erupción de 1980 del monte Santa Elena emitió una nube de cenizas que alcanzó 24 kilómetros de altura (*1*). Hubo que rescatar a personas en helicóptero (*2*). La explosión arrasó bosques y algunas ciudades quedaron cubiertas de cenizas (*3*).

GETTY IMAGES (*nube*); AP PHOTO (*helicóptero*); JOHN BARR, GETTY IMAGES (*vehículo*)

va desde el monte Garibaldi, en la Columbia Británica, hasta el Lassen Peak, en el norte de California, sino también los miles de campos de lava y conos de salpicadura dispersos por la cordillera de las Cascadas.

Pero el monte Santa Elena presenta algunas peculiaridades respecto a otros volcanes de esa alineación de orientación aproximada norte-sur. Una es que está unos 50 kilómetros hacia el oeste. Otra es que, según los estudios sismológicos, la roca situada directamente debajo del Santa Elena está demasiado fría para generar magmas. ¿De dónde obtiene su combustible fundido? Pese a hallarse apartado, el Santa Elena ha sido el volcán más activo de las Cascadas en los últimos siglos. A comienzos del siglo XIX entró en erupción casi continua durante décadas, y la explosión de alrededor de 1480 fue varias veces mayor que la de 1980.

Según sus organizadores, el proyecto ha tratado de dilucidar ese extraño comportamiento siguiendo el rastro del magma desde la placa hasta la superficie. «Empleamos todas las herramientas de las que disponemos para averiguar lo que ocurre», comenta Ken Creager, geofísico de la Universidad de Washington y uno de los directores del proyecto. «Ninguna técnica nos llevará por sí sola adonde queremos llegar. Pero, combinándolas, esperamos obtener una descripción coherente del desplazamiento del magma.»

En diciembre de 2016, varias decenas de investigadores se reunieron en San Francisco. La geología se divide en numerosas especialidades y la mayoría de los reunidos no sabía mucho del trabajo del resto. Ulberg, por ejemplo, es sismólogo, pero allí había además químicos, geólogos tradicionales y especialistas en el campo magnético terrestre. Se reunían para llevar a cabo lo que el geofísico Geoffrey Abers, de la Universidad Cornell, bautizó como la fase de «observación y comparación» del iMUSH: mirar los resultados de los demás para ver cómo podrían encajar entre sí.

Los sismólogos contaban con la historia más accesible; algo paradójico, teniendo en cuenta que un estudio sismológico se asemeja a golpear con un martillo un balón formado por varias capas y deducir su composición a partir de los sonidos que se generan. Desde la erupción de 1980, unos sismómetros instalados de forma permanente en los alrededores del Santa Elena han estado escuchando los terremotos cercanos al volcán. Las ondas sísmicas se propagan a mayor velocidad a través de rocas duras y densas que a través de las calientes y parcialmente fundidas. Comparando las vibraciones sísmicas registradas en diferentes sismómetros situados alrededor del volcán, los expertos se habían formado una imagen, aunque poco detallada, de los lugares donde reside el magma bajo la montaña.

Los investigadores del iMUSH potenciaron la red sismológica con más y mejores instrumentos, como el sismómetro de Ulberg. «Los instrumentos empleados en el iMUSH eran un orden de magnitud mejores y la resolución también era un orden de magnitud superior», afirma Seth Moran, geofísico del Observatorio Vulcanológico de las Cascadas, del Servicio Geológico de EE.UU. (USGS). Los sismómetros registraron las vibraciones naturales y los temblores causados por dos docenas de explosivos de entre 500 y 1000 kilogramos detonados en perforaciones. El resultado ha sido una imagen mucho más precisa de los focos de calor y los conductos existentes bajo la montaña.

Continúa en la página 70

En las entrañas del monte Santa Elena

La erupción de mayo de 1980 causó la muerte de 57 personas. La historia de sus explosiones se remonta a miles de años atrás. Un nuevo estallido podría poner en peligro a millones de personas. Recientemente, se ha investigado su interior y se han hallado datos sorprendentes acerca de su formación y mecanismo eruptivo. Ello podría mejorar la predicción de riesgos, no solo en el caso del Santa Elena, sino también en el de otros volcanes del planeta.



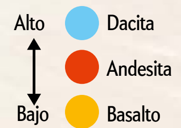
Cómo funciona hoy

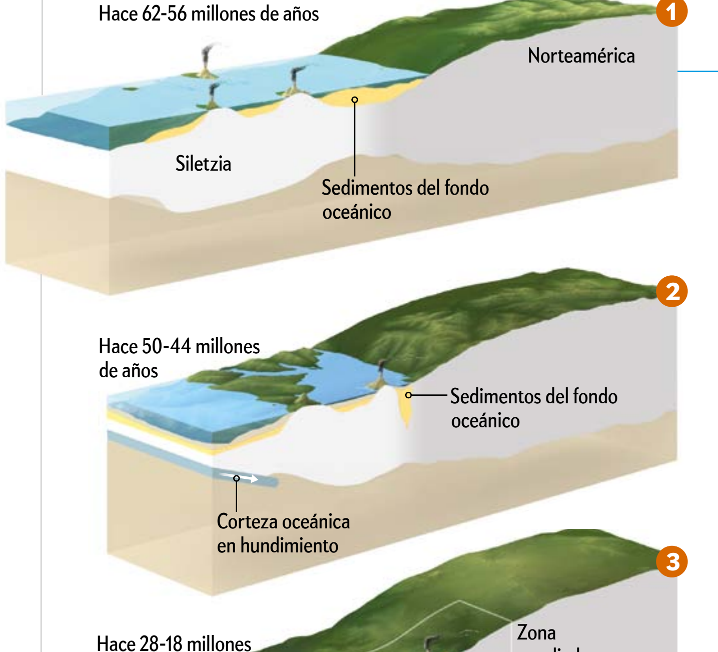
Se han enviado ondas sísmicas bajo el Santa Elena en distintas direcciones. Su velocidad y sus ecos revelan las diferencias de densidad y composición dentro de un complejo entramado de conductos que se extiende más de 72 kilómetros bajo la superficie: algo muy distinto a una simple cámara magmática con un canal rectilíneo que comunica con la cima de la montaña. Otros indicios, como la variedad de magmas en la superficie del volcán, respaldan la idea.

Tres tipos de roca

La diversidad de las rocas expulsadas a la superficie deriva de la intrincada estructura que canaliza los magmas bajo el volcán. Uno de esos tipos de roca, la dacita, presenta un porcentaje relativamente alto de sílice, un compuesto que le confiere viscosidad y ralentiza su movimiento, de forma que tras ella se acumula una enorme presión que acaba en una gran explosión. Otras rocas, como la andesita y el basalto, presentan un menor contenido en sílice y requieren menos presión para moverse.

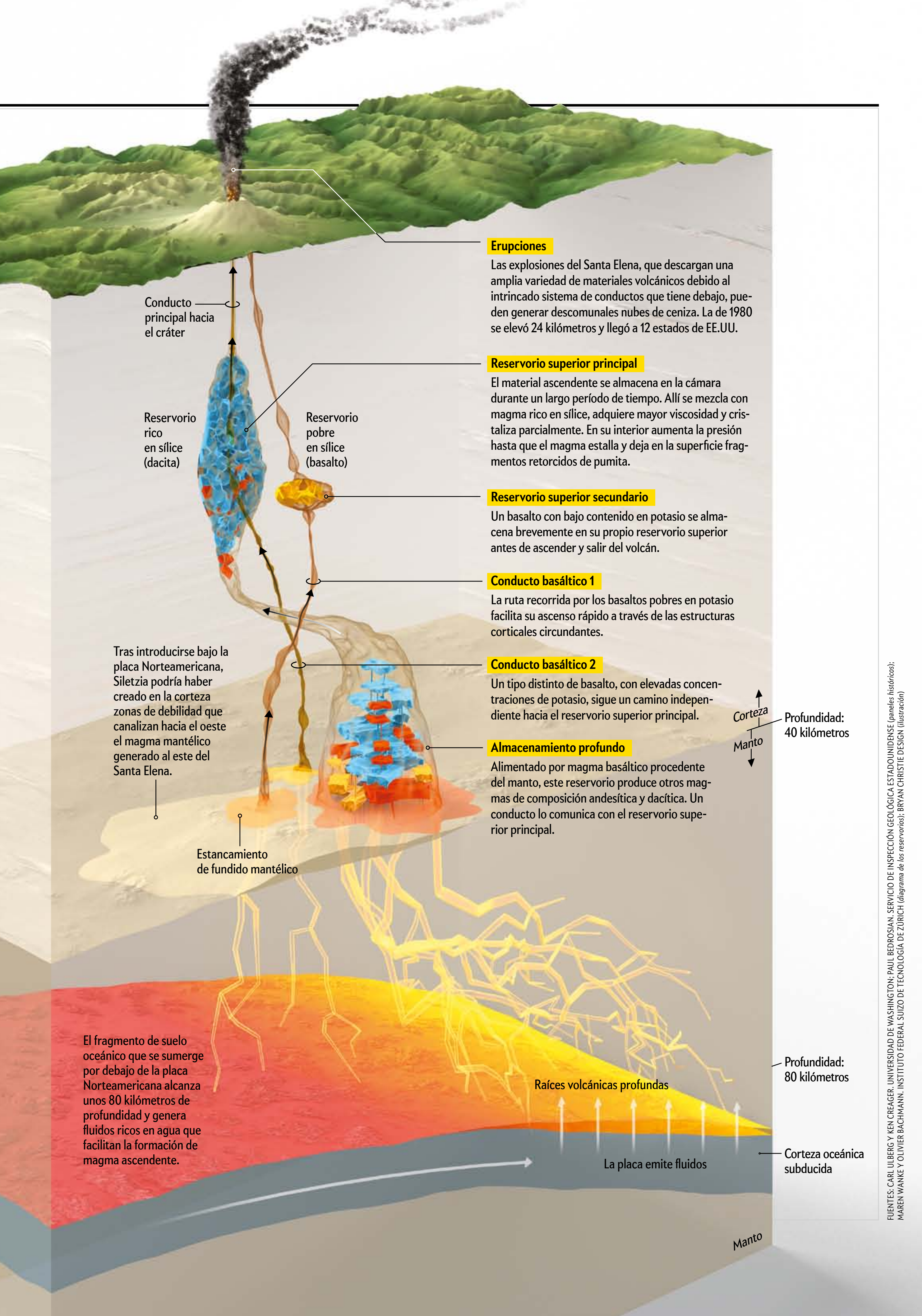
Contenido en sílice





Construir un volcán

El monte Santa Elena se formó bastantes kilómetros hacia el oeste de otros volcanes de la región. Una de las teorías que trata de explicar su inusual emplazamiento se basa en la existencia de una «placa fantasma» de corteza que parece situarse bajo la montaña. La placa representa el fragmento de una antigua región, Siletzia, que se desplazaba hacia el este, enclavada en el fondo oceánico del Pacífico, y que colisionó contra la placa Norteamericana (*1*). A lo largo de decenas de millones de años, la lenta colisión forzó el hundimiento de la antigua Siletzia y los sedimentos del fondo marino bajo el borde de Norteamérica (*2*). Este topetazo geológico originó en la corteza una zona de roca muy fracturada por cuyas grietas asciende el magma caliente. A medida que el agua del fondo oceánico que se subducía se mezclaba con la roca mantélica, más caliente, se originó una cuña de serpentina fría que podría representar el límite occidental del ascenso de magma (*3*).



FUENTES: CARL ULBERG Y KEN CREAGER. UNIVERSIDAD DE WASHINGTON; PAUL BEDROSIAN. SERVICIO DE INSPECCIÓN GEOLÓGICA ESTADOUNIDENSE (*paneles históricos*); MAREN WANKE Y OLIVIER BACHMANN. INSTITUTO FEDERAL SUIZO DE TECNOLOGÍA DE ZÚRICH (*diagrama de los reservorios*); BRYAN CHRISTIE DESIGN (*ilustración*)

Viene de la página 67

CÁMARAS CONECTADAS

La primera sorpresa se halla justo bajo el domo de lava del cráter. Los resultados anteriores habían indicado la presencia de un reservorio superficial de magma a poco más de un kilómetro del cráter. Los nuevos hallazgos parecen mostrar que el área consiste en una compleja red de fracturas que encauzan el magma desde las profundidades.

Tanto los datos previos como los actuales revelan que, bajo esa zona de fracturas, hay un gran reservorio de magma que se extiende entre 8 y 18 kilómetros de profundidad bajo el cráter. Pero las imágenes del iMUSH ofrecen más matices. En la representación tradicional de un volcán, grandes «cámaras» de magma se conectan con la superficie mediante estrechos conductos. «Pero, cuanto más hemos investigado, más raro nos parece que en esa región haya una elevada fracción de líquido en la corteza superior», apunta Brandon Schmandt, sismólogo de la Universidad de Nuevo México. «Puede que entre el 1 y el 10 por ciento del espacio poroso de la roca esté ocupado por fundido, pero eso dista mucho del concepto de cámara.» El reservorio magmático bajo el Santa Elena se asemeja más a una masa pastosa que a un fundido. Las reacciones químicas pueden transformar el magma en distintos componentes, que se almacenan en diferentes partes del reservorio.

Más abajo de esa zona de almacenamiento de magma aguarda otra sorpresa: los datos sísmicos han indicado la presencia de una gran masa de roca demasiado fría y densa para que el magma la atraviese. Las ondas sísmicas recorren la región a alta velocidad, un indicio de que el material es muy denso. Obstaculizado por esa masa rocosa, el magma ascendente parece rodearla hacia el sureste. «El magma ascenderá por el camino más fácil», afirma el sismólogo Alan Levander, de la Universidad Rice. «Creemos que la roca asciende por los laterales de esas regiones de alta velocidad, se acumula en la zona superior y se desplaza hacia los reservorios superiores de magma.»

Conocer el camino completo que recorre el magma podría facilitar la predicción de erupciones. Tras la del Santa Elena de 1980, se detectaron terremotos profundos e inusualmente prolongados a lo largo de supuestos conductos magmáticos. Se han producido terremotos similares antes y después de otras erupciones ocurridas en el planeta. «La idea general es que el magma se mueve de camino hacia una erupción o para rellenar un reservorio tras una erupción», explica John Vidale, sismólogo de la Universidad de Washington. Este tipo de seísmos, los terremotos profundos de largo período, no siempre presagian una erupción; a veces solo suceden tras haberse vaciado un reservorio magmático. «Pero, cuando se producen, algo se está moviendo, y entonces un volcán puede volverse más peligroso de lo habitual», afirma.

LA PLACA FANTASMA

Las ondas sísmicas no son el único medio para observar la Tierra. Por encima de nuestras cabezas, las partículas con carga eléctrica procedentes del Sol bombardean el campo magnético terrestre y generan corrientes eléctricas en el planeta. Mediante detectores electromagnéticos distribuidos por la superficie terrestre se miden las variaciones de esas corrientes a lo largo del tiempo, que reflejan la presencia de líquidos. Este método recibe el nombre de «magnetotelúrico».

Se habían esperado ansiosamente los datos magnetotelúricos del iMUSH por si resolvían una antigua controversia. Los datos previos, más vagos, insinuaban la presencia de un enorme reservorio de líquido bajo el monte Santa Elena, el monte Adams, al este, y el monte Rainier, al norte. Algunos geólogos planteaban que los tres volcanes podrían situarse sobre un vasto mar de magma interconectado.



ORODRUIN: Antes de que su cumbre estallara con la erupción de 1980, el monte Santa Elena se elevaba unos 3000 metros.

GETTY IMAGES

Los datos del iMUSH, mucho más detallados, no han demostrado la presencia de un mar semejante, pero apuntan a otra posibilidad. La elevada conductividad bajo los volcanes parece deberse a una gran región de rocas sedimentarias, enterradas por la tectónica de placas, que contienen agua y que parece que delimitan el borde del último gran fragmento de Norteamérica que se anexionó tectónicamente al Noroeste Pacífico: una placa fantasma que formó parte de una región conocida como Siletzia, hoy enterrada bajo los estados de Washington y Oregón. La sutura entre Siletzia y el resto de Norteamérica podría constituir un área de debilidad que los fluidos procedentes de regiones más profundas podrían atravesar. El Santa Elena parece situarse sobre esa zona o muy cerca de ella.

Una debilidad preexistente en la corteza también podría explicar las grandes masas de roca densa observadas bajo el volcán. Las continuas inyecciones de magma en la zona de sutura podrían enfriarse gradualmente, por lo que se requerirían nuevas inyecciones que se abriesen paso y bordearan las intrusiones solidificadas. Al igual que los datos sísmicos, los magnetotelúricos revelan una masa rocosa densa bajo el monte Santa Elena que los magmas deben de estar bordeando, aunque ambos métodos la sitúan en lugares un poco diferentes. Reconciliar esas diferencias «es la parte más jugosa del proceso», afirma Adam Schultz, quien lleva a cabo investigaciones magnetotelúricas en la Universidad Estatal de Oregón.

DIVERSIDAD DE MAGMAS

Los datos más complejos, sin embargo, no son ni sísmicos ni magnetotelúricos, sino los obtenidos al tomar muestras de roca en la propia montaña y analizar sus componentes. El Santa Elena ha emitido en sus erupciones una gran variedad de lavas. No parece lógico, ya que proceden del mismo volcán, pero un mero vistazo a las paredes del cráter y a sus múltiples texturas y tonalidades anticipa la dificultad de la petrología de las rocas

emitidas (su origen, composición y distribución). A medida que el magma asciende, «se diferencia, asciende de nuevo, se cristaliza, incorpora material, lo asimila y alcanza la superficie», explica Olivier Bachmann, petrólogo que hoy trabaja en Suiza y que participó en la creación del iMUSH.

Uno de esos tipos de roca es ubicuo y revelador. En los alrededores del volcán, los excursionistas pueden tomar fragmentos de pumita, una roca de aspecto espumoso y color claro que flota por su alto contenido en burbujas. Bajo la lupa, es tortuosa. Las burbujas de aire se estiran en forma de largos zarcillos, como si la lava se hubiese desagarrado al solidificarse.

La pumita da una pista para explicar la ferocidad de la erupción de 1980. Se compone de dacita, que contiene un porcentaje relativamente alto de sílice. La sílice confiere viscosidad al magma, que entonces atora los centros emisores de los volcanes y retiene los gases en su interior. Es una de las razones que explican la potencia de la erupción de 1980: la dacita, pegajosa, se encontraba atrapada bajo la montaña e hizo que la presión aumentase hasta que halló una vía de escape al colapsar el flanco norte del volcán.

Pero, a lo largo de su historia, el Santa Elena ha emitido muchos otros tipos de lava. En su flanco sur, cuevas de lava perforan unos basaltos más fluidos, como los observados en los volcanes de Hawái. El cono anterior a 1980, creado en los últimos 2500 años, se componía parcialmente de rocas andesíticas, formadoras de montañas. ¿Cómo puede un solo volcán producir tantos tipos de lava distintos?

El iMUSH se apuntaría un tanto si explicase los magmas dacíticos que volvieron devastadora la erupción de 1980 y, al mismo tiempo, el origen de los otros tipos de magma del volcán. Dawnika L. Blatter, Thomas W. Sisson y W. Ben Hankins, del USGS, han publicado una nueva teoría que bebe de los resultados del iMUSH y de hallazgos anteriores. Su hipótesis se basa en un estudio de un equipo de la Universidad Vanderbilt y del USGS sobre datación de circones, unos cristales que suelen formarse en los magmas ricos en sílice. Los circones contenidos en las lavas del monte Santa Elena han experimentado ciclos repetidos de calentamiento y enfriamiento. A lo largo de miles de años, las inyecciones de roca fundida procedentes del interior parecen haber calentado reiteradamente regiones de roca pastosa. Durante los ciclos térmicos, el magma incorpora sílice de las rocas corticales circundantes, lo que confiere a las lavas del Santa Elena su característica viscosidad. Cuando se introduce suficiente energía en el sistema, el magma modificado fuerza su camino hacia la superficie.

Pero, en ocasiones, las inyecciones de magma de las zonas inferiores tienen energía suficiente para atravesar la región de almacenamiento sin apenas modificarse. El geofísico Weston Thelen, del Observatorio Vulcanológico de las Cascadas, explica los basaltos poco viscosos que ha emitido alguna vez el Santa Elena basándose en que el magma nuevo procedente de las profundidades terrestres puede «ascender deprisa desde el manto, evitar en gran medida el almacenamiento y brotar inmediatamente en la superficie».

La confirmación del modelo podría tener repercusiones en otras partes del mundo. Muchos volcanes violentos emiten sobre todo magmas dacíticos, como el Pinatubo en Filipinas, el Tera en Grecia o el Krakatoa en Indonesia. Si pudieran relacionarse los terremotos, las emisiones gaseosas y otras señales con los procesos magmáticos que acontecen bajo tierra, se dispondría de otro método para predecir erupciones peligrosas. «Una de nuestras limitaciones a la hora de estudiar volcanes peligrosos», explica Sisson, «es que generalmente no sabemos que se están preparando para entrar en erupción hasta que el magma ha alcanzado la corteza superior, donde genera terremotos y deforma del terreno». Saber cómo se cuece un magma en profundidad —cómo se separa químicamente o interacciona con la roca circundante— nos diría a qué se apresta.

PREPARARSE ANTE LO INEVITABLE

Hoy, el volcán Santa Elena se muestra en calma. Los turistas que se asoman al cráter y los científicos que trabajan en sus flancos no deben preocuparse por una erupción inesperada. Pero el reposo del volcán no perdurará. En varias ocasiones desde la erupción de 1980 (la última, en 2016), una serie de ráfagas sísmicas bastante someras ocurridas bajo el cráter ha señalado movimientos de magma. Según Creager, los terremotos no implican una erupción inminente, sino que «el sistema se está recargando; el volcán ha comenzado a preparar su siguiente erupción».

La erupción de 1980 enseñó una dura lección a los geólogos y a los diseñadores de planes de emergencia de la región. La próxima vez que un volcán peligrosamente impredecible haga ruido, no volverán a permitir la presencia de personas en un radio de kilómetros. Si hoy se produjeran caídas de cenizas similares a las acontecidas en erupciones anteriores en las Cascadas, devastarían grandes poblaciones situadas a favor del viento. Las coladas de barro volcánico pueden descender rugiendo por valles fluviales sin apenas dar señales de aviso. El monte Rainier, acechante al sureste de Seattle y Tacoma, es considerado mucho más peligroso que el Santa Elena debido a su tamaño y al número de personas que viven en sus proximidades. Más de 150.000 habitantes del estado de Washington viven y trabajan sobre coladas de barro que han descendido del Rainier en los últimos milenios.

Los resultados del iMUSH abren nuevas perspectivas sobre las señales subterráneas, no del todo entendidas, de que algo está sucediendo. Cuando se produzca la próxima erupción, la diferencia entre la vida y la muerte podría residir en comprenderlas mejor. IyC

PARA SABER MÁS

Deep long-period earthquakes beneath Washington and Oregon volcanoes. M. L. Nichols et al. en *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, vol. 200, n.º 3-4, págs. 116-128, marzo de 2011.

In the path of destruction: Eyewitness chronicles of Mount St. Helens. Richard Waitt. Washington State University Press, 2015.

Magma reservoirs from the upper crust to the moho inferred from high-resolution Vp and Vs models beneath Mount St. Helens, Washington State, USA. Eric Kiser et al. en *Geology*, vol. 44, n.º 6, págs. 411-414, junio de 2016.

Seismic evidence for a cold serpentinized mantle wedge beneath Mount St Helens. S. M. Hansen et al. en *Nature Communications*, vol. 7, art. 13242, noviembre de 2016.

Voluminous arc dacites as amphibole reaction-boundary liquids. Dawnika L. Blatter, Thomas W. Sisson y W. Ben Hankins en *Contributions to Mineralogy and Petrology*, vol. 172, n.º 5, art. 27, mayo de 2017.

EN NUESTRO ARCHIVO

Las erupciones del monte Santa Elena. Robert W. Decker y Barbara Decker en *IyC*, mayo de 1981.

Hundimiento de los volcanes. Peter Francis y Stephen Self en *IyC*, agosto de 1987.

Futuro del Etna. Tom Pfeiffer en *IyC*, junio de 2003.



RÍO DE MICROBIOS: En la Gran Fuente Prismática del Parque Nacional de Yellowstone, en EE.UU., bacterias y algas se congregan para crear un gigantesco tapete anaranjado.

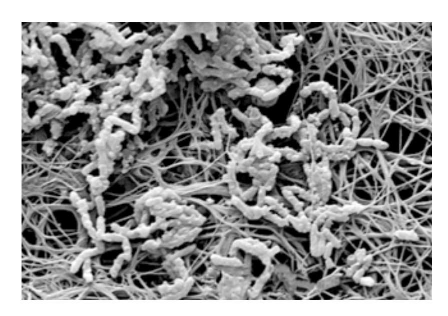


BIOQUÍMICA

BIOPELÍCULAS MORTÍFERAS

Los tapetes tridimensionales bacterianos se cobran tantas vidas como el cáncer y se muestran indemnes a los antibióticos. Los científicos comienzan ahora a dirigir sus armas contra ellas mismas

Karin Sauer



MICROAMENAZA: El interior de este catéter médico ha quedado revestido por una película de bacterias (*micrografía*) que puede causar infecciones sanguíneas.

Karin Sauer es profesora de biología en la Universidad de Binghamton, de la Universidad Estatal de Nueva York, y directora asociada del Centro Binghamton de Investigación de Biopelículas, donde estudia los mecanismos que rigen el crecimiento y la dispersión de las biopelículas, así como su resistencia a los antibióticos.



Adoro el Parque Nacional de Yellowstone.

He visitado países tan remotos como Japón, he seguido los pasos de los antiguos romanos, he alzado la mirada ante la torre inclinada de Pisa, he contemplado los volcanes de lejos y de cerca, y he tocado con mis manos los glaciares. Aun así, siempre regreso a Yellowstone y fijo mi vista en las cascadas y los lagos, sobre todo en los vivos arcoíris multicolor de sus numerosas fuentes termales, géiseres, fumarolas y pozas de lodo hirviente.

Ese cromatismo me cautiva. Está creado por miles de millones de diminutas bacterias inmersas en una matriz babosa. Las bacterias resultan imperceptibles a simple vista, en esa masa amorfa que forma comunidades denominadas tapetes microbianos o biopelículas. A través de las lentes del microscopio esas películas muestran una estructura tridimensional notable, con los microbios adheridos unos a otros hasta formar numerosos pisos y filamentos, sinuosos senderos y estructuras semejantes a torres minúsculas. A mí me recuerdan ciudades de baba, una metrópolis palpitante de edificios y rascacielos cuyas calles son más transitadas que las grandes avenidas tokiotas o neoyorquinas. Todos nosotros las hemos visto: crean una espesa y viscosa capa en los desagües y los recalcitrantes cercos alrededor de la bañera.

En medicina, empero, las biopelículas no son una mera molestia ni un espectáculo admirable, sino una amenaza directa para la salud. Cuando las bacterias consiguen crearlas en el interior del cuerpo humano, resisten a los antibióticos y pueden causar infecciones crónicas en los campos quirúrgicos, los pulmones y las vías urinarias. Las biopelículas colonizan los dispositivos médicos y los implantes como catéteres, cánulas y sondas urinarias, las articulaciones protésicas o las válvulas cardíacas artificiales. En conjunto, el 65 por ciento de las infecciones contraídas en el entorno hospitalario tienen como culpables a bacterias que crecen en forma de biopelícula. Solo en los hospitales de EE.UU. se producen cada año 1,7 millones de infecciones, con cerca de 99.000 fallecimientos, así de tremendo es el perjuicio que causan. Se calcula que las biopelículas se cobran cada año tantas vidas como el cáncer, sin duda, una estadística funesta.

El problema radica en que nuestras estrategias para combatir las infecciones bacterianas van dirigidas hacia especies individuales, no contra las biopelículas. Estas no solo poseen una capacidad portentosa para evadir las defensas y la respuesta inmunitaria del organismo que deja de responder a las vacunas, sino que a menudo resultan ser intratables con los antibióticos. Esa resiliencia extraordinaria no es consecuencia de la adquisición de farmacorresistencia por parte de las bacterias ni de su transformación en los «supergérmenes» de los que tanto se oye hablar últimamente. La tenacidad de las biopelículas radica en su matriz tridimensional. En su interior las bacterias se comunican e intercambian información con la que organizan sus estructuras, y se suministran sostén y protección mutuos mediante la síntesis de proteínas y otras sustancias necesarias para la supervivencia.

Junto con mis colaboradores hemos logrado penetrar en la matriz y escuchar las señales de información que las bacterias envían de un lado para otro. A veces, hasta podemos tomar el control de las señales y usarlas contra los microbios. Nuestros intentos se parecen mucho a los actos de sabotaje que pretenden desatar el caos en una ciudad. Planeamos colocar semáforos en rojo donde no los hay o redirigir el tráfico. En nuestro caso, comenzamos a ser capaces de decirles que abandonen su matriz protectora, con lo que se vuelven más vulnerables a los medicamentos. Estamos cosechando pruebas preliminares de que las bacterias que forman las biopelículas devienen básicamente distintas de sus congéneres sueltas. En 1998, George A. O'Toole y Roberto Kolter demostraron que la formación de biopelículas por parte de la bacteria del suelo *Pseudomonas fluorescens* requería la síntesis de nuevas proteínas, así como la presencia de 24 genes. La mayoría de ellos desempeñaban funciones desconocidas, si bien algunos codificaban proteínas empleadas en la fijación a las superficies, como las adhesinas. Los genes misteriosos apuntaban a que la transformación en una

EN SÍNTESIS

Las biopelículas se forman cuando grupos de bacterias se encierran en una matriz viscosa que impide el paso de los antibióticos y las toxinas.

Los biólogos han descubierto que ciertas sustancias segregadas por los microbios actúan como señal de dispersión para los moradores de la biopelícula.

La dispersión expone las bacterias a los antibióticos y puede ser combinada con otras tácticas.

Ya se diseñan nuevos nanomateriales que entorpecen la adhesión de las bacterias, primer paso necesario para la formación de la biopelícula.

PÁGINAS ANTERIORES: GETTY IMAGES

Creación y destrucción de las biopelículas

Las bacterias no son solitarias. La mayoría florece en comunidades complejas llamadas biopelículas cuyos integrantes se brindan apoyo mutuo y se atrincheran, lo que dificulta su erradicación. En su seno, los microbios se comunican, comparten nutrientes y se ocultan entre una densa matriz protectora. Los científicos están desvelando los secretos de la formación de las biopelículas y han averiguado modos para limitar su crecimiento o disgregarlas.

Dispersión de las bacterias

La vida de una biopelícula

Las células bacterianas se agrupan. Comienzan a mutar activando genes y sintetizando proteínas que los microbios aislados no movilizan. Algunas de esas proteínas facilitan la adhesión a las superficies (1). Las bacterias se envuelven de una matriz viscosa que las protege frente a toxinas y antibióticos (2). En el interior de la matriz, las bacterias crean una microcolonia, donde se intercambian genes beneficiosos y nutrientes (3). Si el hacinamiento es excesivo, los miembros de la colonia segregan señales bioquímicas que desencadenan su dispersión, dando vía libre a la creación de nuevas biopelículas en otros lugares (4).

Célula bacteriana

Microcolonia

1 2 3 4

Matriz

Cuatro tácticas contra las biopelículas

A Nuevos materiales dificultan la adhesión de las biopelículas a las superficies. Estos son deliberadamente rugosos a una escala nanométrica, con estructuras que interfieren con las proteínas de fijación que segregan las bacterias.

B Si la matriz se debilita es posible provocar la disgregación de la biopelícula. La masa viscosa alberga moléculas de ADN, que son degradadas por la enzima ADNsa I. Esta es objeto de ensayos contra biopelículas que causan infecciones de oído.

C Esferas huecas llamadas liposomas, cargadas de antibióticos, penetran en la matriz. Allí se mezclan con las bacterias y liberan su carga tóxica. Los virus que infectan bacterias también pueden abrirse paso entre la matriz.

D Las bacterias segregan cierto ácido graso para avisar a las demás de que deben marchar. Cuando se hallan solas son vulnerables, por lo que se está recurriendo a ese ácido para incitar a las bacterias a separarse. El óxido nítrico, compuesto gaseoso, puede servir con idéntico fin.

JEN CHRISTIANSEN

bacteria adherida implicaba la adopción de una nueva fisiología por su parte. Entonces, en 2002, nuestro equipo demostró que las bacterias no solo mutan cuando entran en contacto con una superficie, sino que siguen transformándose y adaptándose a medida que la biopelícula crece y madura, pasando de unas escasas células fijadas al principio a una verdadera comunidad, con distintos conjuntos de proteínas producidos en cada etapa. Trabajos posteriores revelaron que las proteínas posibilitan pasar de una etapa a la siguiente con un orden establecido.

Tales hallazgos sugieren que las biopelículas, a semejanza de las ciudades, se construyen desde cero siguiendo un plan maestro, con una fase constructiva, y de manzana en manzana. En el laboratorio podemos paralizar su formación en una etapa concreta o incluso remodelarlas y hacerlas retroceder a etapas anteriores añadiendo sustancias que inhiben o que estimulan algunas de esas proteínas. Dicha estrategia puede aunarse con otras, como añadir recubrimientos nanotexturizados a las superficies a fin de impedir la adhesión de las bacterias.

UNA ADHESIÓN MALSANA

Impedir ante todo la fijación de las bacterias es un buen punto por donde comenzar. Gran parte de la investigación en este campo ha girado en torno al desarrollo de materiales para superficies o recubrimientos capaces de matar las bacterias con el mero contacto. Eso es posible con revestimientos o impregnaciones que desprendan sustancias antibacterianas en concentraciones elevadas. Algunas de tales superficies ya son habituales en los hospitales: suturas impregnadas de antibióticos o cemento óseo provisto de perlas impregnadas con ellos, así como catéteres y sondas, apósitos para heridas y tubos endotraqueales recubiertos de plata coloidal o de nanopartículas de ese metal. Los iones de plata matan las bacterias por contacto. El mecanismo bactericida no se ha dilucidado por completo, pero sabemos que los iones causan daños oxidativos que provocan la muerte de la bacteria. Además de la plata, se están realizando ensayos con óxidos y sales de metales (hierro, mercurio, telurio, zinc o titanio) con fines clínicos.

Los revestimientos y las superficies impregnadas, empero, tienen su talón de Aquiles, porque las sustancias antimicrobianas incorporadas se agotan. Ello, sumado a la preocupación que suscita el uso excesivo de los medicamentos y los compuestos antibacterianos (como la propia plata), y la consiguiente aparición de resistencias bacterianas, ha propiciado el desarrollo de nuevos materiales que reduzcan la fijación a través de mecanismos más mecánicos. Las superficies están inspiradas en la naturaleza: imitan la textura de la piel de tiburón o las texturas autolimpiantes presentes en las hojas de loto, o las funciones químicas desplegadas por los mejillones para repeler las bacterias. Las superficies inspiradas en los seres vivos no necesariamente impiden que los microbios se fijen, pero interfieren con las proteínas que segregan a modo de sistema de agarre. A escala microscópica, el proceso actúa alterando la rugosidad de la superficie. Ello es posible con la adición de nanoestructuras como cerdas, cristales y túbulos fabricados con polímeros que atraen las moléculas de agua, como el polietilén glicol (inspirado en los mejillones), y compuestos denominados polímeros zwitteriónicos, que están inspirados en las propiedades antiadherentes de los glóbulos sanguíneos.



CERRAR FILAS: estas bacterias de género *Bacillus* (*bastoncillos de la micrografía*) se envuelven en una matriz protectora.

Las nanoestructuras se pueden disponer con distintas separaciones entre sí para obstaculizar la fijación de las bacterias en distintos grados. Algunas de esas superficies bioinspiradas ya gozan de un amplio uso en los hospitales. Otras se hallan en fase de pruebas preliminares, con trabas como las limitaciones en su fabricación o problemas de toxicidad pendientes de resolver. A la larga, los estudios clínicos aleatorizados determinarán cuáles de esas nuevas superficies serán aptas para el uso en medicina.

ATAQUE CONTRA LA MATRIZ

A pesar de la esperanza que suponen las superficies contra las biopelículas, se precisan estrategias muy diferentes para tratar las que superan esas barreras antiadherentes o que aparecen sobre los implantes médicos, lo que las convierte en peligrosas y recalcitrantes. En tales casos, la matriz babosa que las envuelve se convierte en el objetivo. Compuesta por largas cadenas de moléculas de azúcares llamadas polisacáridos, amén de proteínas y ADN, la matriz ayuda a las capas de microbios de diversas formas. Por un lado, actúa como una capa protectora que impide o limita el paso de algunos antibióticos y de unas moléculas inmunitarias llamadas anticuerpos, con lo que las bacterias del interior quedan a salvo de ellos. Además, sirve como soporte estructural que aglutina la comunidad bacteriana entre sí y a la superficie. Por eso, su disgregación provoca la pérdida de integridad y su desmoronamiento, que acaba con los grandes acúmulos de bacterias dispersos en grupos más pequeños o en células sueltas. Cuando eso sucede, las células bacterianas que se desprenden vuelven a ser vulnerables a los medicamentos y a la acción del sistema inmunitario.

La degradación de la matriz se consigue por medio de enzimas, proteínas que aceleran las reacciones químicas. Por desgracia, su composición, más en concreto el tipo de proteínas y polisacáridos que la conforman, varía enormemente entre las bacterias, por lo que cada tipo exige una enzima específica. Así pues, los tratamientos destinados a degradar las proteínas y los polisacáridos deben ser adaptados al tipo de bacteria que ha creado la biopelícula.

En cambio, el ADN contenido en la matriz puede ser un blanco más sencillo, pues parece ser sensible a la degradación por una única enzima: la ADNsa I. Varios ensayos clínicos han centrado su atención en ella; en este momento la enzima está siendo evaluada, en combinación con antibióticos, como tratamiento contra la otitis media crónica y otras infecciones por biopelículas. La ADNsa ya se administra a los pacientes con fibrosis quística afectados por enfermedad pulmonar temprana y ha dado lugar a una mejoría sustancial de la función respiratoria. (En este caso, no destruye las biopelículas, sino que parece reducir la viscosidad del esputo, lo cual facilita la desobstrucción de las vías respiratorias y la eficacia del antibiótico.)

TOQUE DE RETIRADA

Otra estrategia más ha surgido de la observación del modo en que proliferan las biopelículas. Una vez consolidadas pueden ser desmanteladas mediante el proceso de la dispersión. Esta sobreviene cuando los recursos del interior, como los nutrientes, se agotan, cuando la colonia queda superpoblada, o bien cuando el entorno exterior deviene inestable. La disgregación facilita la supervivencia de sus moradores y abre la posibilidad de fundar nuevas comunidades en otros lugares.

Pero las células sueltas que abandonan la biopelícula son justamente el tipo de bacterias vulnerables que tan bien sabemos tratar en medicina. Así que, ¿cómo podemos convencer a las bacterias de las biopelículas para que alteren sus hábitos y salgan de su escondrijo? Se han descubierto diversos desencadenantes que pueden precipitar esa huida. Por un lado, las bacterias parecen tener su propio modo de avisar a las demás compañeras de que ha llegado el momento de dispersarse. Las investigaciones con *Pseudomonas aeruginosa*, una bacteria empleada como modelo de estudio en la formación de las biopelículas que es la culpable de numerosas infecciones crónicas y hospitalarias, han revelado que produce una pequeña molécula, el ácido *cis*-2-decenoico (*cis*-AD), un ácido graso que le permite advertir a los miembros de su comunidad que es hora de marchar. Otros experimentos han evidenciado que el *cis*-AD puede hacer extensiva esa señal a biopelículas formadas por otras especies de bacterias. En conjunto, el citado compuesto parece inducir la dispersión de las biopelículas por lo menos en otras cinco especies de bacterias y levaduras. También hay indicios de que otras bacterias producen versiones distintas de dicho ácido graso, lo que significa que podrían hablar «dialectos» distintos para avisar a los miembros de sus comunidades de que hay que separarse. Pese a estar aún en fase experimental, muy probablemente el uso de tales moléculas mensajeras, junto con antibióticos, constituirá una futura estrategia de tratamiento.

DENNIS KUNKEL, SCIENCE SOURCE

Asimismo, se han descubierto otros desencadenantes de la disgregación que responden a cambios en las condiciones ambientales, como los altos niveles de metales pesados o la escasez de oxígeno. Esos factores, que son muy diversos, estimulan la dispersión al reducir la concentración de una molécula mensajera universal de las células, la di-guanosín monofosfato cíclico (di-GMPc). La concentración de esta sustancia determina la adherencia de las bacterias a las superficies, pues cuando abunda, la biopelícula y la producción de matriz crecen, y cuando escasea, las bacterias se multiplican por separado. Si bien las variaciones en la concentración de di-GMPc como respuesta a esos desencadenantes han sido vinculadas con la eliminación de al menos el 80 por ciento de la biomasa de la biopelícula, no todos ellos son aptos para el uso en medicina.

Un candidato factible es el óxido nítrico, un gas incoloro. Nuestro sistema inmunitario se sirve de él para repeler a las bacterias invasoras, y en medicina se destina a mejorar la oxigenación en los pacientes aquejados de hipertensión pulmonar (causada, por ejemplo, por la enfermedad pulmonar obstructiva crónica). Los estudios de laboratorio han demostrado que el óxido nítrico propicia la dispersión de las biopelículas creadas por una amplia variedad de bacterias. Aplicado solo, ya las reduce un promedio del 63 por ciento, pero, si se combina con compuestos antimicrobianos como la colistina, es capaz de disgregarlas casi por completo en experimentos in vitro.

Con todo, pese a tan alentadores resultados, el óxido nítrico no está exento de problemas. Puede resultar tóxico si se difunde por ciertas zonas del organismo, de ahí la importancia de que actúe únicamente en el foco infeccioso, propósito difícil por su naturaleza gaseosa. Para intentar solventar algunos de esos inconvenientes, se han concebido diversas formulaciones y dispositivos. Un ejemplo es la cefalosporina con 3'-diazonodiolato. Esta combinación de fármacos está compuesta por un antibiótico (la cefalosporina) y una sustancia productora de óxido nítrico que solo se activa cuando entra en contacto con bacterias portadoras de la enzima β-lactamasa; las bacterias resistentes a ciertos antibióticos, como la penicilina y la ampicilina, suelen estar provistas de ella.

DETECTAR E INFECTAR

Otra estrategia destinada a combatir las biopelículas consiste en desatar una infección mortífera entre las bacterias que las constituyen. Como las personas, estas también son vulnerables a los virus, que en su caso son denominados bacteriófagos, o fagos. El ser humano es inmune a ellos, pero las bacterias quedan infectadas de forma permanente o mueren. Desde una serie de estudios pioneros en 1996 que examinaron la interacción de los fagos con las biopelículas, las investigaciones se han enfocado en descubrir los que pueden destruir las bacterias en el seno de la biopelícula. Asimismo, los que penetran en ella pero no destruyen a sus ocupantes pueden actuar como portadores de antibióticos o sustancias degradantes de la matriz (como la ADNsa I) al diseminarlos entre todas las ocupantes de la biopelícula. Fuera de EE.UU., los fagos ya se están administrando contra las neumonías infecciosas provocadas por las biopelículas en los pacientes con fibrosis quística.

Pero este tratamiento, como otras tácticas, también adolece de inconvenientes. Como los fagos infectan y destruyen las bacterias con suma especificidad, cada tipo infecta exclusivamente una concreta, por lo que no son aptos como bactericidas generalistas. Y las bacterias pueden acabar adquiriendo resistencia contra su ataque, del mismo modo que a los antibióticos.

Para superar ese riesgo de resistencia se han diseñado liposomas, o vesículas lipídicas, como transportadores de sustancia. Denominados nanopartículas por su ínfimo tamaño, la idea detrás de esos porteadores diminutos es que liberen compuestos que destruyan las células de la biopelícula o desestabilicen a esta para que los antibióticos, los compuestos antibacterianos o las enzimas degradadoras de la matriz actúen justamente allí donde son necesarias: en el corazón de la biopelícula o contra las propias bacterias. El mecanismo de direccionamiento se basa en la adición de lípidos a los liposomas que imitan a los lípidos presentes en las membranas plasmáticas de las bacterias, similitud que facilita su difusión a través de la matriz. Y aquí radica la belleza del sistema: los lípidos similares permiten a los liposomas fusionarse con la bacteria e introducir directamente su carga en el corazón del microbio como si de una inyección se tratara. Una ventaja de esta estrategia es su especificidad, puesto que los compuestos antibacterianos y contra las biopelículas se liberan únicamente en estas y en ningún otro lugar. Los liposomas ya se emplean ampliamente como sistemas de administración de fármacos antimicrobianos.

COMBINACIÓN GANADORA

Además de las tácticas descritas hasta ahora, otras líneas de investigación (algunas en fase preliminar, otras ya en fase clínica) persiguen impedir o reducir la formación de las biopelículas. Las estrategias aquí presentadas son algunas de las más prometedoras, pero existen muchas otras que son objeto de estudio en todo el mundo, extremo que pone de manifiesto la importancia de su control y la dificultad de conseguirlo. Un reto general es que no hay dos biopelículas iguales. Cada especie bacteriana fabrica y escapa de su creación de un modo ligeramente distinto, con sus propias variedades de matriz o moléculas de comunicación, con diferentes proteínas y otras sustancias. Pero estamos catalogando esas diferencias, y cada pequeño avance nos acerca más a un tratamiento que puede ayudar a los enfermos. Al final, probablemente tendremos que recurrir a numerosas estrategias, desplegadas en combinación, para lanzar la bola de demolición contra las ciudades bacterianas que amenazan nuestras vidas. IyC

PARA SABER MÁS

Initiation of biofilm formation in *Pseudomonas fluorescens* WCS365 proceeds via multiple, convergent signalling pathways: A genetic analysis. George A. O'toole y Roberto Kolter en *Molecular Microbiology*, vol. 28, n.º 3, págs. 449-461, abril de 1998.

Biofilms as complex differentiated communities. P. Stoodley et al. *Annual Review of Microbiology*, vol. 56, págs. 187-209, octubre de 2002.

Cephalosporin-3'-diazeniumdiolates: Targeted NO-donor prodrugs for dispersing bacterial biofilms. Nicolas Barraud et al. en *Angewandte Chemie International Edition*, vol. 51, n.º 36, págs. 9057-9060, septiembre de 2012.

Antimicrobial activity of metals: Mechanisms, molecular targets and applications. Joseph A. Lemire, Joe J. Harrison y Raymond J. Turner en *Nature Reviews Microbiology*, vol. 11, n.º 6, págs. 371-384, junio de 2013.

Escaping the biofilm in more than one way: Desorption, detachment or dispersion. Olga E. Petrova y Karin Sauer en *Current Opinion in Microbiology*, vol. 30, págs. 67-78, abril de 2016.

EN NUESTRO ARCHIVO

Razón y mecanismo de la comunicación bacteriana. Richard Losick y Dale Kaiser en *IyC*, abril de 1997.

Películas bacterianas. J. W. Costerton y P. S. Stewart en *IyC*, septiembre de 2001.

Vencer la resistencia a los antibióticos. M. Cartelle Gestal en *IyC*, mayo de 2013.

Un punto débil de la resistencia bacteriana. C. Zimmer en *IyC*, marzo de 2015.



PSICOLOGÍA

La inseguridad emocional puede intensificar el apego hacia nuestras pertenencias

Francine Russo

Fotografías de Timothy Archibald

Nuestras cosas,



nosotros mismos



Francine Russo es periodista especializada en psicología y comportamiento.

Es un aula de vivos colores. Le piden a un niño de cinco años que describa su posesión favorita. Habla de la camiseta de dinosaurios que su madre le obligó a meter en la lavadora esa mañana. Después juega a dos sencillos juegos de ordenador. Los investigadores lo han amañado para que gane el primer juego y pierda el segundo (y para que no sufra, le dejarán ganar el tercero, y último, al final del experimento). Tanto después de ganar como de perder, un adulto le preguntará, como a los demás niños de este estudio, realizado por el psicólogo Gil Diesendruck, de la Universidad Bar-Ilan de Israel, y su colaboradora Reut Perez, si estaría dispuesto a prestarle su objeto favorito a otro niño durante una noche.

Este experimento pretendía averiguar si una alteración en la percepción de sí mismos provoca que los niños pequeños sientan mayor apego por sus objetos personales más preciados. El resultado fue impactante. La frecuencia con que se mostraban dispuestos a compartir sus pertenencias más atesoradas cuando ganaban era el doble que cuando perdían. En un experimento de control en el que las posesiones les preocupaban menos, ganar o perder el juego no afectaba a su inclinación por desprenderse de los objetos.

Estos experimentos son parte de los recientes esfuerzos por entender la relación entre los seres humanos, su sensación de seguridad y sus posesiones materiales. Muchas de estas nuevas investigaciones se basan en los trabajos que en la segunda mitad del siglo xx realizaron los psicólogos John Bowlby, Mary Ainsworth y Donald Winnicott, y en sus famosas teorías de que el apego que siente un niño por su madre y la calidad de ese apego influyen de manera considerable en sus relaciones futuras. Winnicott también propuso que cuando un niño empieza a percibir que tiene un yo independiente, distinto del de su madre, puede aprender a sentirse más seguro con un «objeto transicional» que la sustituye (un muñeco al que se aferra, digamos).

Desde entonces, otras ramas de la ciencia, desde la psicología evolutiva y la antropología hasta los estudios de mercado y la neurociencia, han afirmado también que nuestras pertenencias cubren muchas necesidades emocionales. Nos reconfortan en la soledad y aumentan la confianza en nuestras capacidades. No solo nos hacen sentirnos seguros porque sustituyan a personas importantes de nuestra vida, sino que las vemos como una prolongación de nosotros mismos. Creemos —o quizás actuamos como si lo creyéramos— que nuestra misma esencia impregna esos objetos. Si se dañan o se pierden, somos nosotros mismos quienes nos sentimos dañados o perdidos.

Esta relación con nuestras pertenencias puede parecer descabellada. Pero es perfectamente normal. «Todos conservamos cosas y poseerlas nos produce una gran satisfacción. Forma parte de nuestra herencia evolutiva», explica Nick Neave, psicólogo evolutivo de la Universidad de Northumbria, en Inglaterra. Guardar comida era, y todavía es, un importante mecanismo de supervivencia, explica Neave. Lo mismo ocurre con las armas y las herramientas.

Como las personas son seres sociales, el tipo de seguridad que necesitamos es más complejo, va más allá de lo básico para la supervivencia física. Puede ser útil recordar la jerarquía clásica de necesidades publicada en 1934 por el psicólogo Abraham Maslow. Se representa visualmente como una pirámide: en su gran base aparecen las necesidades fisiológicas (comida, aire y agua), y a continuación vienen, de abajo arriba, la seguridad física (refugio, armas), el amor y el ser parte de algo (relaciones y comunidad), el reconocimiento (fortaleza del ego) y, en la cúspide, la autorrealización (salud emocional óptima en la que desarrollamos nuestro potencial). Con la posible excepción de la autorrealización, las pertenencias pueden servir para darnos seguridad en todos estos ámbitos, incluyendo la seguridad del ego y la confianza en las relaciones personales.

EN SÍNTESIS

Los seres humanos somos animales sociales. Para sentirnos emocionalmente seguros necesitamos fortaleza de ego y confianza en las relaciones con otras personas.

Cuando nos falta un apego seguro a alguien querido, podemos otorgar significados profundos o cualidades humanas a nuestras posesiones inanimadas para rellenar ese vacío.

Creemos que con el contacto físico los objetos se impregnan de nuestra esencia y que nos impregnamos de la de otros cuando tocamos sus cosas.

Antropomorfizar nuestras pertenencias más preciadas es normal. Pero algunas personas vulnerables desarrollan el síndrome de acumulación.

TEORÍAS DEL APEGO

Se han identificado cuatro categorías de apego. Si usted sentía en la infancia que quienes le cuidaban iban a estar siempre a su lado y a satisfacer sus necesidades, habrá desarrollado un estilo de apego seguro. Pero si le abandonaron en momentos de necesidad, es probable que llegase a prescindir del apego y aprendiera a ser independiente y emocionalmente distante. En cambio, si percibió que quien le cuidaba era inconstante, podría haber desarrollado un estilo de apego ansioso: usted se aferra o vigila a las personas de su círculo íntimo para asegurarse de que permanecerán a su lado. Quienes se sintieron lastimados de algún modo por quienes los cuidaban en la primera infancia desarrollan un estilo de apego temeroso o de evitación, que les hace recelosos cuando han de acercarse a otros. En un estudio clásico, realizado en Estados Unidos en 1987, los investigadores Cindy Hazan y Phillip Shaver, a la sazón en la Universidad de Denver, descubrieron que el 56 por ciento de las personas presentan un estilo de apego seguro, alrededor del 20 por ciento, ansioso, y en torno al 24 por ciento, de evitación.

En fecha reciente, y basándose en esos primeros estudios, se han hecho experimentos que detallan los papeles que los diferentes estilos de apego desempeñan en la historia de amor que mantenemos con nuestros objetos. Puede que estén aumentando el estilo de apego ansioso y otros estilos inseguros. Un metanálisis de investigaciones con universitarios estadounidenses reveló que el porcentaje de estudiantes con apego seguro descendió del 49 por ciento en 1988 al 42 por ciento en 2011. Los autores especularon con explicaciones y correlaciones, entre ellas el incremento constatado del individualismo, el narcisismo y el materialismo.

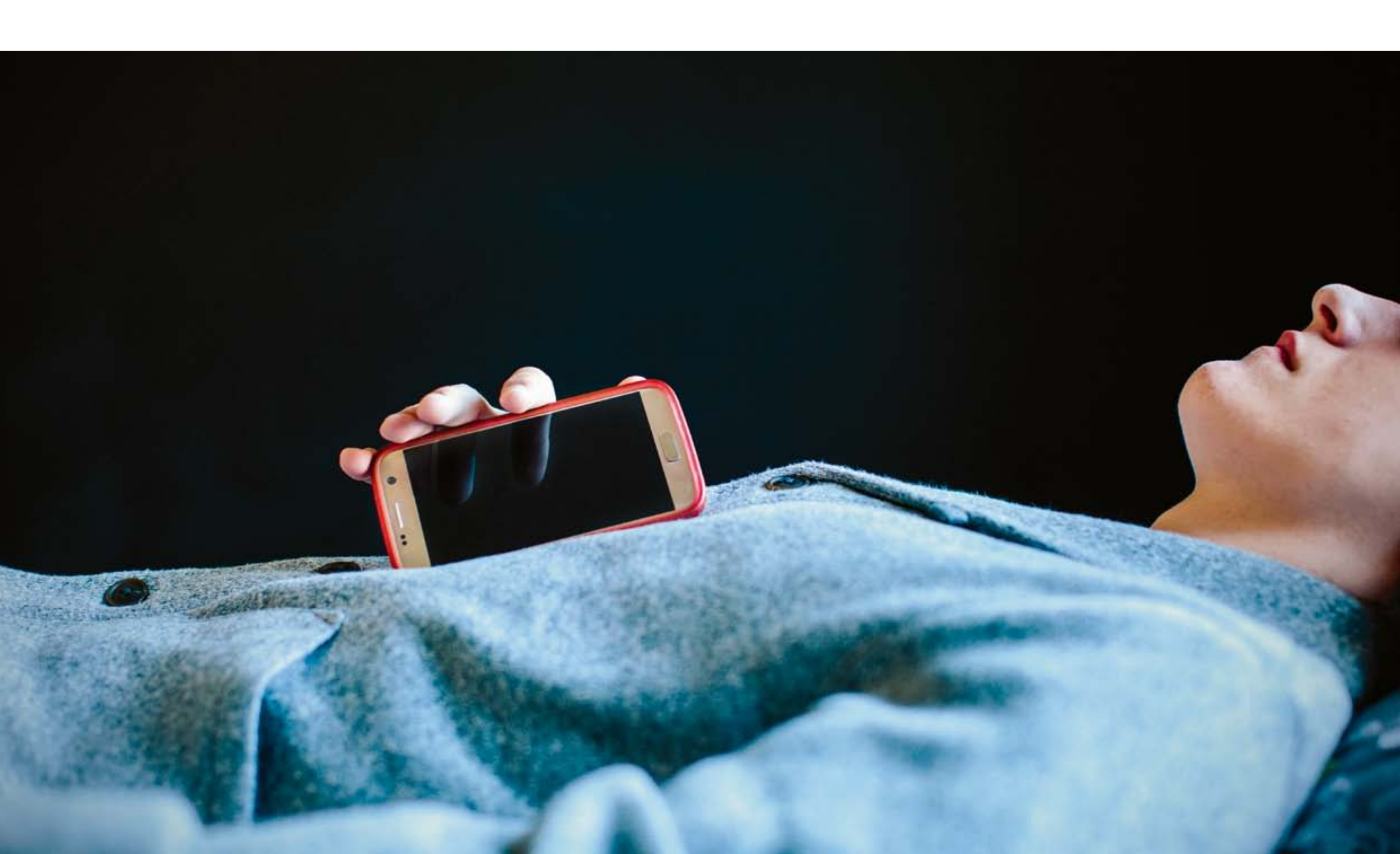
A medida que hay más personas que sufren de un estilo de apego inseguro, es probable que también sea más frecuente que se busque consuelo emocional en objetos materiales. Según un estudio del psicólogo Lucas A. Keefer, en la actualidad en la Universidad del Sur de Misisipi, y sus colaboradores, la gente se aferra más a sus pertenencias cuanto menor es la confianza en sus seres queridos. Para esta investigación, publicada en el *Journal of Experimental Social Psychology* en 2012, se pidió a los participantes de un primer grupo que escribieran sobre tres casos recientes en los que alguien cercano les hubiese fallado. Los de un segundo grupo debían escribir sobre algún desconocido que les había fallado o sobre cuando se habían fallado a sí mismos. Los que debían reflejar la poca fiabilidad de amigos o parejas declararon una mayor incertidumbre en poder contar con otros, así como un mayor apego a objetos.

En la tercera fase del experimento se pidió a un grupo de estudiantes universitarios que escribieran, bien acerca de la inseguridad que sentían sobre sus capacidades, bien sobre la que sentían en sus relaciones personales. Después, se les pidió a todos el teléfono móvil, asegurándoles que se lo devolverían en cuanto redactaran un texto de longitud indeterminada. Keefer descubrió que quienes escribieron sobre incertidumbres acerca de sus relaciones mostraron una mayor ansiedad a la hora de desprenderse de su teléfono y, viendo lo pronto que terminaron la redacción, una necesidad más urgente de que se lo devolvieran. Estos resultados se mantenían aun cuando se tomaba en cuenta en su evaluación la percepción que los participantes tenían de sus teléfonos como instrumentos sociales.

¿Por qué nos aferramos a los objetos cuando quienes nos importan nos defraudan? Esa vieja camiseta no nos muestra compasión. Tampoco el osito. Pero estos objetos son de fiar, siempre presentes y bajo control.

CÓMO REEMPLAZAN LOS OBJETOS A LAS PERSONAS

Es larga la bibliografía científica sobre cómo y por qué antropomorfizamos nuestras cosas, animales, herramientas o máquinas. Necesitamos la conexión humana y debemos encontrar el



modo de cubrir esa necesidad incluso cuando no tenemos otras personas cerca.

Cuando las personas a quienes queremos no están presentes, buscamos la manera de sentirnos como si estuvieran con nosotros. Investigadores de la Universidad McGill pidieron a un grupo de participantes que pensaran sobre alguien con quien se sintieran unidos y en quien confiaran. Después les pidieron que visualizaran que estaban con esa persona y escribieran unas frases sobre ello. A otro grupo se le pidió lo mismo, pero la persona en la que debían pensar era tan solo una conocida.

Los resultados, publicados en 2016 en *Psychological Science* por los psicólogos Jennifer Bartz, Kristina Tchalova y Can Fenerci, confirman las investigaciones previas que muestran que algunas personas intentan aumentar su sensación de conexión social otorgando atributos humanos a objetos. En ese estudio, todos los participantes evaluaron cuatro objetos según sus características sociales y no sociales (uno de ellos era un despertador que se movía al sonar). Los sujetos a quienes se les pidió que escribieran sobre un conocido, así como aquellos que revelaron un estilo de apego ansioso en un test previo, eran más proclives a antropomorfizar los objetos y a dar mayor puntuación a sus características sociales. Solo quienes debían visualizar que estaban con un ser querido eran menos proclives a humanizar los objetos que el grupo que imaginaba estar con conocidos. «Nos resultó algo sorprendente que una modificación relativamente menor —pensar en un ser querido en quien confiaran y visualizarlo— pudiese tener un efecto semejante», señala Bartz.

Otorgar cualidades humanas a nuestras pertenencias importantes no solo sirve de compensación cuando nos sentimos inseguros sobre nuestras relaciones con personas cercanas. Según un estudio reciente de Keefer, algunos individuos ven cualidades humanas en objetos debido a circunstancias concretas; por ejemplo, cuando estamos superando una separación o cuando nos mudamos a otra localidad. Otras personas, como muestra la investigación, presentan mayor tendencia a antropomorfizar objetos por la sencilla razón de que es un rasgo de su carácter. En un experimento con estudiantes universitarios, publicado en 2016 en *Journal of Individual Differences*, Keefer descubrió que hacer que las personas de este último tipo recuerden una pertenencia favorita puede servirles —igual que un cuidador fiable durante la infancia— de base segura desde la que explorar y correr riesgos. Esta tendencia muestra que nuestros objetos favoritos no solo compensan las deficiencias, sino que nos ayudan a crecer, explica Keefer. Y sugiere que la tecnología humanoide, como los robots y los asistentes personales digitales, tienen la capacidad de aportar fuentes adicionales de seguridad emocional.

LOS OBJETOS COMO BÁLSAMO

Volvamos al niño y al juego de ordenador. Perder reducía su confianza en sí mismo; por ello, necesitaba pensar que su camiseta favorita era inequívocamente suya. Numerosos estudios muestran que los adultos también usamos nuestros «juguetes» para compensar la inseguridad. Naomi Mandel, profesora de mercadotecnia de la Universidad Estatal de Arizona, y sus colaboradores publicaron en 2017 en el *Journal of Consumer Psychology* que lo que compramos puede ofrecernos un «bálsamo psicológico». Los objetos tangibles podrían reemplazar simbólicamente la falta de confianza y consuelo. Citan un ejemplo clásico de un estudio de 1982, de los psicólogos Robert A. Wicklund y Peter M. Gollwitzer, quienes descubrieron que los estudiantes de un máster en administración de empresas que recibían menos ofertas de empleo o peores calificaciones solían exhibir más símbolos de éxito empresarial (trajes caros, relojes de lujo).

En un estudio de 2016, Ian Norris, psicólogo social y profesor de mercadotecnia de la Universidad Berea, en Kentucky, también concluye que el ansia por los bienes de consumo está motivada en parte por la inseguridad interpersonal. En un artículo titulado «¿No puedo comprar amor?», publicado en 2012 en *Personality and Individual Differences*, Norris exponía que quienes presentan un estilo de apego ansioso podrían sustituir las relaciones con personas por relaciones con objetos cuando se sienten solos.

De forma consciente o inconsciente, muchos consideramos que nuestras posesiones forman parte de nuestro yo extendido. Más profunda y menos consciente es la creencia de que por medio del contacto físico nuestras cosas se impregnan de nuestra esencia

Parece que concuerda con la investigación de Winnicott sobre el estilo de apego, explica Norris: «Los otros son una extensión de la idea que uno se hace de sí mismo. No se desarrolla una percepción estable de uno mismo sin relaciones sociales satisfactorias. El "yo" es, hasta cierto punto, un constructo social: mi relación con otros contribuye en gran medida al conocimiento de quién soy. Cuando esas relaciones resultan inestables o insatisfactorias, puede faltar la conexión que el yo necesita, y se asigna un significado a objetos para llenar el vacío».

SOMOS TODO LO QUE PODEMOS LLAMAR NUESTRO

Hacia 1890, el psicólogo y filósofo William James propuso que el yo de un hombre incluía no solo su cuerpo y su consciencia, sino todo lo que posee y le atañe. De forma consciente o inconsciente, muchos consideramos que nuestras posesiones forman parte de nuestro yo extendido. Más profunda e incluso menos consciente es la creencia de que por medio del contacto físico nuestras cosas se impregnan de nuestra esencia. Aunque esta idea del «contagio» fue observada a finales del siglo XIX por los antropólogos en las sociedades «primitivas», numerosas investigaciones muestran que la creencia en el contagio sigue vigente en las culturas modernas europeas y americanas, explica Olga Stavrova, psicóloga social de la Universidad de Tilburg, en los Países Bajos. En un artículo publicado en *Judgement and Decision Making* en 2016, ella y sus coautores escribían que las investigaciones muestran de manera sistemática que la gente siente aversión ante la idea de entrar en contacto con artículos tales como el jersey de un asesino en serie o la gorra de un oficial nazi. Hallaron reacciones parecidas con el arte. «Las personas

tienden a creer implícitamente que la música está impregnada de la esencia de su compositor», explica Stavrova. Se esforzarán por no tener que escuchar una pieza musical si el compositor era alguien muy inmoral.

También los más jóvenes creen en el contagio, y con un giro interesante. Cuando Diesendruck y sus colaboradores investigaban la disposición de los niños a compartir una posesión preciada, llevaron a cabo otro experimento: un adulto le muestra a una niña una fotografía de otra niña de la misma edad y le cuenta que pega a sus amigos y no escucha ni a sus padres ni a sus maestros. «¿Estarías dispuesta a darle a esta niña tu camisa favorita?» Responde: *No, no, no.* «Pero ¿si primero lavamos la camisa?», pregunta el adulto. «¿Y si la lavamos mucho?» Bueno..., entonces *puede que sí.*

Esta respuesta que los investigadores escuchaban una y otra vez muestra que los niños creen que sus pertenencias contienen —y retienen— partículas de ellos mismos. Cuando esta esencia se «elimina» del objeto, lavándolo, por ejemplo, toleran mejor la idea de que esté en contacto con alguien «malo». Este «contagio a la inversa» es muy interesante, explica Diesendruck, porque al contrario que el «contagio directo» no casa con nuestros conocimientos sobre la contaminación biológica.

Resulta destacable, añade Diesendruck, que un niño crea que puede afectarle el contacto de otra persona con un objeto que ya no está presente. Diesendruck sugiere imaginarlo como una cuerda, con el yo en un extremo y el objeto en el otro. Es como si el yo viajara a través de la cuerda hasta el objeto, tocara a alguien «malo» y esa maldad regresara hasta el yo.

Varios estudios cerebrales recientes han dado pruebas de que consideramos nuestras pertenencias como parte de nuestro yo extendido. En un experimento que apareció en 2013 en *Social Cognitive and Affective Neuroscience,* las psicólogas Kyungmi Kim y Marcia Johnson, por entonces en Yale, descubrieron por medio de imágenes de resonancia magnética funcional que los objetos que una persona había imaginado previamente como «suyos» activaban las mismas regiones cerebrales que las referencias al yo de la persona.

CUANDO EL APEGO SE CONVIERTE EN OBSESIÓN

Las personas con un estilo de apego ansioso pueden ser más propensas a adjudicar características humanas a sus cosas, a las que consideran una prolongación de sí mismas. Pueden ser también más propensas a desarrollar un problema de acumulación. A la mayoría nos gusta conservar objetos de valor sentimental, pero eso se convierte en una patología —que afecta a entre el 4 y el 5 por ciento de los adultos— cuando alguien acumula cosas y no puede deshacerse de ninguna sea cual sea su utilidad o valor, incluso si son perjudiciales. La quinta edición del *Manual diagnóstico y estadístico de los trastornos mentales* reconoció, en 2013, el síndrome clínico de acumulación como una afección compleja independiente, diferente del trastorno obsesivo compulsivo. Hace tiempo que los investigadores intentan precisar sus causas.

Quienes acumulan cosas crean intensas asociaciones sentimentales de sus posesiones con personas y hechos. Los investigadores nos dicen que algunos de quienes acumulan hablan de «querer morirse» cuando se desprenden de una posesión muy preciada, o que lo comparan con «perder parte de uno mismo». Si bien la mayoría de los estudios sobre la acumulación se han realizado en EE.UU. y Europa, parece que podría darse también en las culturas orientales, si bien un nuevo estudio sobre niños taiwaneses indica que la relación de las personas con los objetos materiales puede ser diferente en las sociedades colectivistas y en las individualistas.

Entre mediados de los años noventa y 2007, Randy Frost, de la Universidad Smith, y Gail Steketee, de la Universidad de Boston, desarrollaron un modelo de la acumulación que cuenta con gran aceptación. Se basa en la terapia cognitivo-conductual, basada en cambiar los patrones de pensamiento para modificar los sentimientos y la conducta. Dicho modelo considera la acumulación como resultado de tres factores básicos. El primero es la presencia de trastornos como la depresión y la ansiedad. Los que padecen el síndrome de acumulación usan sus pertenencias para salvaguardar su identidad, para «mitigar sus miedos» y construir «fuertes» que les hagan sentirse más seguros. El segundo es mantener ideas erróneas sobre los objetos. Por ejemplo, quienes acumulan se sienten responsables de cuidar de sus posesiones como si de criaturas vivas se tratara. Creen que pilas de folletos y periódicos antiguos pueden contener información que quizá necesiten algún día, y no se pueden permitir vivir sin ellas. Por último, las personas que acumulan experimentan reacciones emocionales extremas cuando adquieren objetos y cuando se desprenden de ellos. Son fuertes las sensaciones de placer y orgullo cuando consiguen algo nuevo; así como las de culpa, miedo y dolor cuando intentan deshacerse de objetos. Según investigaciones en curso, la relación entre las personas que acumulan y sus posesiones es compleja. La terapia cognitivo-conductual tan solo consigue una notable mejoría clínica en alrededor del 35 por ciento de quienes acumulan, según un metanálisis de 2015.

Si las personas que sienten una necesidad incontrolable de guardarlo todo se encuentran en el extremo de un continuo al que pertenecemos todos, en el cabo opuesto se hallan quienes poseen el típico impulso de guardar cosas que les recuerdan a personas y momentos significativos. «El apego sentimental es normal y puede ser bueno», explica Russell Belk, investigador del consumo y psicólogo de la Universidad York de Toronto que, a finales de los años ochenta, realizó trabajos fundacionales sobre cómo nuestras posesiones se vuelven parte de nuestro yo extendido. Documentó cómo los damnificados por desastres naturales se sienten heridos por la pérdida de sus cosas. Cuando las noticias sobre el último huracán o incendio nos muestran a las víctimas llorando por la pérdida de sus bienes más preciados, nos sentimos identificados. Todos tenemos objetos que nos marcan. Perderlos nos duele. MyC

PARA SABER MÁS

Attachment to objects as compensation for close other's perceived unreliability. Lucas A. Keeler et al., en *Journal of Experimental Social Psychology*, vol. 48, n.º 4, págs. 902-917, julio de 2012.

Clutter, clutter everywhere. Scott O. Lilienfeld y Hal Arkowitz en *Scientific American Mind*, septiembre de 2013.

Toys are me: Children's extension of self to objects. Gil Diesendruck y Reut Perez en *Cognition*, vol. 134, págs. 11-20, enero de 2015.

Emotional regulation, attachment to possessions and hoarding symptoms. Philip J. Phung et al. en *Scandinavian Journal of Psychology,* vol. 56, n.º 5, págs. 573-581, octubre de 2015.

The role of attachment style and anthropomorphism in predicting hoarding behaviours in a non-clinical sample. Nick Neave et al. en *Personality and Individual Differences,* vol. 99, págs. 33-37, septiembre de 2016.

EN NUESTRO ARCHIVO

¡Mío! Bruce Hood en *MyC* n.º 57, 2012.

por Marc Boada Ferrer



Marc Boada Ferrer es divulgador científico y experto en ciencia experimental.

Superimanes permanentes

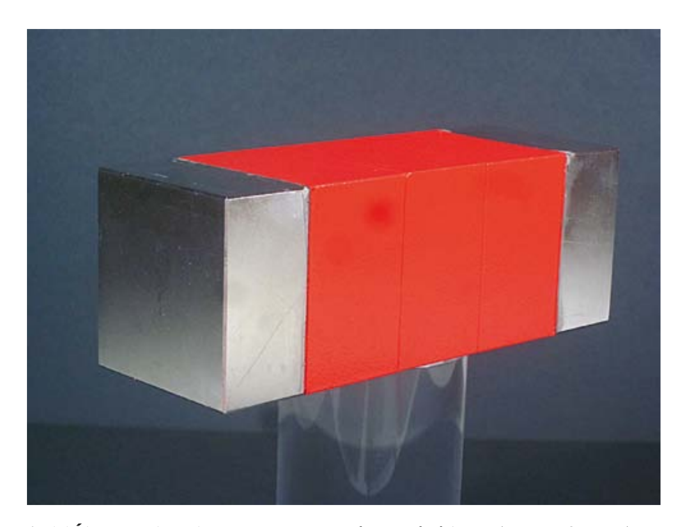
Con unos imanes de tierras raras y varias piezas de hierro pueden construirse sistemas magnéticos con campos próximos a un tesla

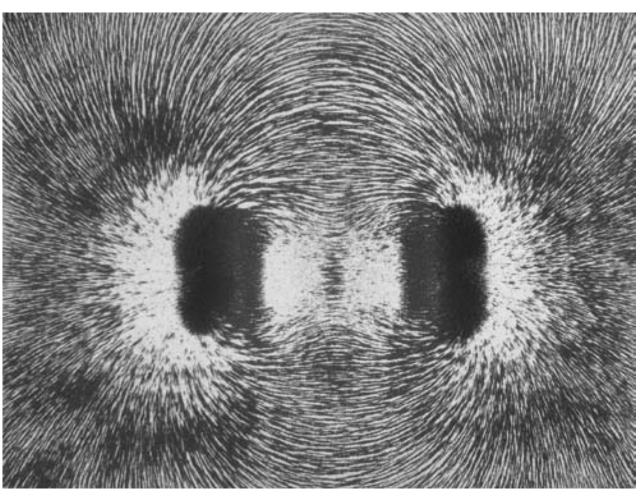
A lo largo de los años, en esta sección hemos descrito multitud de dispositivos en los que los protagonistas han sido los imanes permanentes. En todos los casos su presencia ha sido imprescindible, tal y como ocurre en muchos otros aspectos de nuestra vida cotidiana. Se estima que en una vivienda normal y corriente hay más de cien imanes, mientras que en un automóvil la cifra se aproxima a los ochenta. El motivo es simple: los imanes, y su campo magnético asociado, desempeñan un papel clave en multitud de dispositivos tecnológicos.

Pero un imán, por sí solo, es poco más que una curiosidad divertida. Para extraer la máxima potencia magnética debe trabajar con su gran aliado: el hierro. Gracias a él resulta posible producir los intensos campos magnéticos que permiten experimentar todo un universo de fenómenos de gran interés para el científico aficionado. A modo de ejemplo, baste citar los efectos termomagnéticos, magnetoópticos y electromagnéticos. Eso sí, para estudiarlos necesitaremos imanes muy particulares, o, mejor dicho, circuitos magnéticos especialmente diseñados. Así pues, dedicaremos esta entrega a su construcción, y reservaremos una próxima a los distintos fenómenos que cabe analizar.

Hoy, cualquier empresa nos ofrecerá básicamente tres materiales magnéticos. Por un lado, los imanes de ferrita, que reconoceremos por su color casi negro. Son de composición próxima a la de la magnetita, baratos, potentes, resistentes a las agresiones químicas y capaces de trabajar a temperaturas relativamente altas. Estos imanes son conocidos desde antiguo, pero desde hace pocas décadas se han visto superados por nuevos compuestos en los que las tierras raras permiten conseguir intensidades magnéticas que dejarían patidifuso al propio Faraday. Hablamos fundamentalmente de dos productos: los imanes de samario y cobalto (caros, delicados, frágiles y poco aptos para trabajar a altas temperaturas), y los de neodimio, también con boro y hierro, los cuales ofrecen un mejor compromiso entre precio, potencia y disponibilidad de tamaños. En ambos casos, el gran enemigo es la corrosión. Por ello, los fabricantes los recubren con un depósito electrolítico de níquel que les proporciona el característico acabado brillante que permite reconocerlos a distancia.

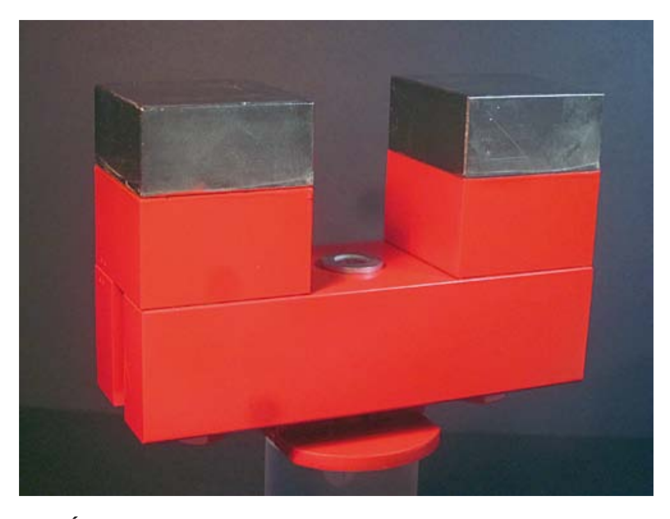
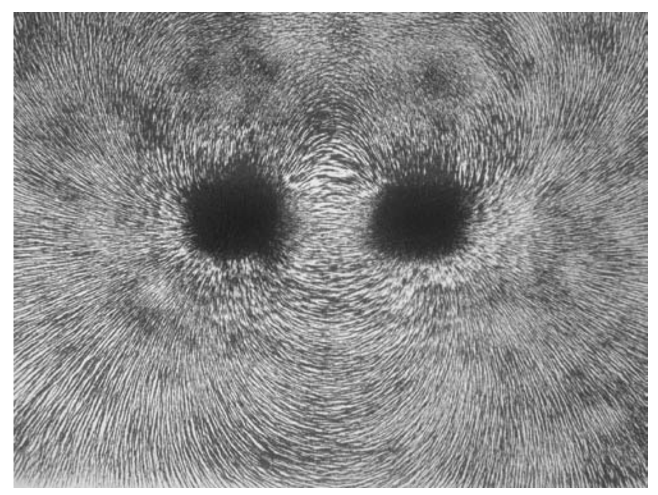
Sin duda, nuestra mejor opción pasa por el neodimio, por lo que serán estos los que usaremos aquí. Distintos experimentos necesitarán configuraciones diferentes del campo magnético. Sin embargo, todo ello tiene un precio. Pensemos en que un imán de neodimio de $50 \times 50 \times 25$ milímetros tiene un coste próximo a los 50 euros, y que en algunos experimentos podremos necesitar hasta cuatro. Por ello, merece la pena escoger una sola medida y, a partir de ella, construir todos los montajes que necesitemos. En los casos aquí descritos hemos optado siempre por los bloques citados, de 5 centímetros de arista y 2,5 de espesor, si bien lo que sigue puede aplicarse a cualesquiera otras dimensiones que elija el experimentador en función de su presupuesto o de sus objetivos de investigación.





CORTESÍA DE MARC BOADA

1. IMÁN DE BARRA: Interponer una barra de hierro (*izquierda, rojo*) entre dos imanes de neodimio (*izquierda, gris*) permite crear un circuito magnético sencillo en el que las líneas de campo (*derecha*) se canalizan de forma más eficiente que en el caso de un imán aislado. En este dispositivo, con unas dimensiones totales de $50 \times 50 \times 150$ milímetros, la intensidad del campo magnético en la superficie se aproxima a los 5000 gauss.

2. IMÁN DE HERRADURA: La forma de los imanes y la disposición de los polos pueden reforzar o debilitar el campo magnético. Una configuración con forma de herradura (*izquierda*) canaliza el campo (*derecha*) hacia el interior del circuito, lo que aumenta la densidad de las líneas y permite alcanzar intensidades de hasta 6000 gauss.

CORTESÍA DE MARC BOADA

Antes de proceder, observemos las fotografías que ilustran este texto. Vemos que, en todos los casos, los imanes, que destacan por su tono metálico, solo dan cuenta de una pequeña parte del conjunto. Para descubrir el motivo estudiemos el caso más sencillo, correspondiente al típico imán de barra.

Por supuesto, comenzar con un imán con forma alargada sería lo más práctico. Pero, si buscamos una intensidad elevada o dimensiones generosas, su precio será prohibitivo. Este inconveniente puede solventarse situando entre dos imanes pequeños una barra de hierro que encaje a la perfección. Ello se debe a que el hierro es un material ferromagnético, por lo que canaliza las líneas de campo. Gracias a ello, un montaje inteligente nos permitirá crear circuitos magnéticos más potentes y útiles que los que proporcionaría un imán de neodimio por sí solo. En el caso que ilustramos aquí (*véase la figura 1*) hemos interpuesto una barra de hierro de sección cuadrada de 5 centímetros de arista por 10 centímetros de longitud. No obstante, el reto no es sencillo: el experimentador deberá aprender a montar el conjunto sin accidentes ni roturas.

Los problemas aparecen porque la fuerza que ejerce el imán sobre la barra de hierro equivale a un peso de decenas de kilogramos. No podemos colocar el imán simplemente con la mano, ya que nos arriesgamos a sufrir terribles pellizcos e incluso accidentes bastante más graves, como puede certificar quien esto escribe. Por tanto, al montar el imán en la barra de hierro, esta deberá estar muy bien fijada a algún banco de trabajo no magnético.

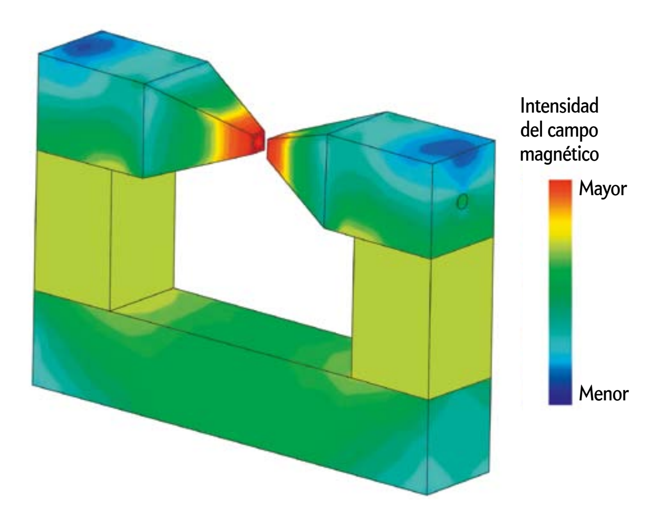
Luego, sobre la cara en la que colocaremos el imán, situaremos la zona más gruesa de una larga cuña de madera, dura y bien pulida (unas cinco o seis veces más larga que el imán y con un espesor de cuatro o cinco centímetros). Por último, situaremos el imán sobre esta calza y, muy despacio, la iremos retirando con la mano. Con ello lograremos que el imán se acerque lentamente al bloque de hierro y aterrice en él con suavidad. Y, al mismo tiempo, conjuraremos un segundo peligro: la posible rotura del imán, de naturaleza frágil. Esto también puede ser una catástrofe, ya que un imán dañado es inútil y, además, podemos recibir el impacto de algún fragmento afilado. Tras situar el primer imán en un lado de la barra, haremos lo propio con el segundo.

Hecho todo esto, tendremos un monstruoso imán —en realidad, un circuito magnético simple— razonablemente barato y de una potencia notable. En la superficie del que ilustramos aquí, la intensidad del campo llega a unos 5000 gauss, o 0,5 teslas, lo que nos faculta para medir la susceptibilidad magnética de diversas sustancias, entre otros usos. Cabe señalar que esta intensidad no es muy distinta de la que mediríamos en el imán de neodimio aislado. Sin embargo, la distribución de las líneas de campo es mejor, ya que los polos se encuentran más separados y las líneas no se cierran del mismo modo.

Con todo, este campo magnético puede considerarse relativamente débil en comparación con otros. ¿Por qué? Porque su forma sigue sin ser óptima. Observemos las líneas de campo que muestra la figura 1. (Para revelar las líneas de campo, hacen falta buenas dosis de paciencia, papel rugoso y virutas de hierro espolvoreadas con un colador o un salero.) Estas adoptan la forma de un circuito «abierto»: las líneas que salen por los extremos se pierden en el espacio o encuentran dificultades para cerrarse. Que la forma de los imanes y la disposición de los polos pueden reforzar o debilitar el campo magnético se sabe desde hace siglos. Por esa razón, el imán de barra se dobló para dar lugar al de herradura, el cual brinda intensidades mucho mayores para el mismo volumen de material magnético.

Fijémonos ahora en las líneas de campo que se muestran en la figura 2. Al estar los dos polos más próximos y mejor orientados, las líneas se unen tras haber recorrido una distancia más corta y presentan una densidad mayor. Se trata, por tanto, de un diseño más eficiente.

Para conseguir esta configuración habremos de usar de nuevo un par de cuñas, tomar todo tipo de precauciones y emplear un bloque de hierro alargado, como indica la fotografía. Con esta disposición, todas las líneas de campo se canalizan hacia el interior del circuito, cerrándose entre los dos polos. Aquí las intensidades aumentan. Aunque es difícil destacar un punto en el que medir la intensidad, esta se aproximará por lo general a los 6000 gauss: ¡entre 10.000 y 25.000 veces más que el campo magnético terrestre! Para el experimentador, el imán de herradura permite descubrir las corrientes de Foulcaut, el efecto de freno magnético o la interacción con los tubos de rayos catódicos. No obstante, esta disposición no se adaptará a muchos más experimentos.



3. ZAPATAS POLARES: El uso de piezas de hierro cónicas y con las dimensiones adecuadas, conocidas como «zapatas polares» (*izquierda*), permite generar campos magnéticos muy intensos en el pequeño espacio que las separa. El imán mostrado aquí, de unos 12 kilogramos, genera un campo magnético que alcanza los 7400 gauss. La imagen de la derecha muestra una simulación informática de la intensidad del campo magnético en distintas zonas del circuito.

La mayoría de las pruebas interesantes pasan por someter sustancias o dispositivos a grandes campos magnéticos. Pero ¿cómo hacerlo cuando la intensidad es máxima en el interior de un circuito magnético cerrado? La respuesta se conoce desde hace tiempo: interrumpiendo el circuito en algún punto y dejando un pequeño volumen de aire en el que experimentar. Ello se consigue creando las condiciones necesarias para que las líneas de campo se concentren en esa zona de trabajo. A tal fin, los imanes no deberán ser las piezas terminales del circuito. Antes bien, sobre ellos instalaremos las llamadas «zapatas polares», las cuales canalizan el campo hacia la zona de trabajo, denominada «entrehierro».

Las zapatas polares tienen formas adaptadas al experimento que deseemos realizar y, como el resto del circuito, se mecanizan en hierro casi puro. Al respecto hay poco margen de elección. El material para el circuito y las propias zapatas debe ser de una alta permeabilidad magnética. Lo ideal sería emplear aleaciones a base de níquel y cobalto, pero su precio resultará prohibitivo. Por ello, tomaremos una barra cuadrada de hierro comercial, típicamente de una aleación con bajo contenido en carbono, y con una arista igual a la de los imanes seleccionados. A partir de recortes de esta barra mecanizaremos todos los elementos del circuito.

Observemos la figura 3. En ella se muestra un imán en el que las zapatas polares tienen una forma cónica que concentra el campo en un espacio de un centímetro de espesor. La determinación de esa distancia no es baladí. Por un lado, cuanto más reducido sea el entrehierro, mayor será el campo en su interior. Pero, por otro, un volumen pequeño limita el tamaño de las muestras con las que podremos ensayar y, por tanto, la observación de los efectos del campo magnético.

En el modelo que ahora estamos considerando, lo que se pretende experimentar es el efecto Hall (en una entrega posterior explicaremos cómo hacerlo y en qué consiste), por lo que nos bastará con un espacio angosto entre las zapatas polares para instalar el sensor. Obsérvese que todo el conjunto mantiene una sección constante e idéntica a la de los imanes. La mayor parte del circuito es de hierro, pintado en rojo para distinguir el imán a cierta distancia. Lo más fácil es cortar los bloques de hierro, mecanizarlos y luego soldarlos entre sí para, finalmente, pulir, pintar y montar los imanes y las zapatas.

Por desgracia, este método de construcción es poco versátil, ya que nos obliga a trabajar con un entrehierro de dimensiones fijas. Por ello, resulta mucho más práctico hacerlo graduable. Si volvemos nuestra atención a la fotografía, podremos apreciar una ranura en la base del imán. En esta, y gracias a unos tornillos, hemos fijado los brazos verticales. Ello permite regular su separación y, por tanto, ajustar el espacio entre las zapatas polares.

Este imán es el más potente de los que describimos aquí. Sobre las dos caras enfrentadas de las zapatas polares hemos medido un campo de 0,9 teslas a temperatura ambiente, que en el centro del entrehierro adquiere un valor homogéneo de 0,74 teslas, o 7400 gauss. Conseguirlo no fue fácil, pero gracias a la inestimable ayuda de Albert Nieto y Marc Cejalvo, del departamento de I+D de Ingeniería Magnética Aplicada S.A., pudimos optimizar dimensiones, costes y número de bloques de neodimio, cuatro en este caso. Las simulaciones que realizaron permiten visualizar a la perfección el campo magnético en el interior de este superimán.

No obstante, pese a estos espectaculares resultados, nuestro diseño aún no lo resuelve todo. En ocasiones, sobre todo cuando queremos investigar fenómenos magnetoópticos, debemos someter la muestra al campo magnético y, además, atravesarla con un rayo de luz, habitualmente polarizada. Para ello perforaremos las zapatas polares con un taladro de 8 o 10 milímetros, a través del cual enviaremos el haz luminoso. En este caso, el campo magnético difícilmente llegará a los valores citados arriba. Para observar fenómenos asociados a la rotación del plano de polarización de la luz, la longitud de la muestra resulta fundamental. De nuevo, habremos de buscar un compromiso entre el volumen del entrehierro, que deberá ser más amplio, y la intensidad del campo. Hemos encontrado valores óptimos para la experimentación que indican que, para un entrehierro de 40 milímetros, podemos llegar fácilmente a los 1700 gauss: lo suficiente para poner a prueba diversos líquidos y observar cómo interaccionan en su seno el campo magnético y las radiaciones ópticas polarizadas. Todo ello lo explicaremos con detalle en una futura entrega.

CORTESÍA DEL AUTOR (*imán*); ALBERT NIETO Y MARC CEJALVO (*simulación del campo magnético*)

por Patrick Honner

Patrick Honner es profesor de matemáticas y computación en un instituto de secundaria de Brooklyn, Nueva York. Reconocido divulgador, en 2013 recibió el Premio Presidencial a la Excelencia en la Enseñanza de Matemáticas y Ciencias de EE.UU.



Por qué ganar en piedra, papel o tijera no lo es todo

¿Cómo funciona el concepto de equilibrio de Nash en este popular pasatiempo?



Jugar a piedra, papel o tijera puede ser muy útil para decidir quién tiene que sacar la basura. Pero ¿ha pensado alguna vez en lo que sucede cuando, en vez de jugar una sola vez, dejamos que el pasatiempo continúe ronda tras ronda? Al principio empleamos una táctica que nos otorga ventaja, pero nuestro contrincante se da cuenta con rapidez y logra darle la vuelta a la situación. A medida que evolucionan las estrategias, se llega a un punto en el que ninguno de los dos jugadores parece ser capaz de mejorar. ¿Por qué ocurre esto?

En 1950, el matemático John Nash demostró que, en cualquier juego con un número finito de jugadores y un número finito de opciones, existe siempre una combinación de estrategias tal que ningún jugador puede obtener mejores resultados cambiando únicamente su propia táctica. La teoría que describe estos perfiles de estrategias estables, o «equilibrios de Nash», revolucionó el campo de la teoría de juegos, alteró el curso de la economía y cambió la forma en que se estudia y analiza todo, desde los tratados políticos hasta el tráfico en Internet. Y, además, le valió a Nash el premio Nobel de economía en 1994.

Estrategias puras y mixtas

Así pues, ¿cómo se produce el equilibrio de Nash en el juego de piedra, papel o tijera? Analicemos una situación en la que dos jugadores, A y B, juegan una y otra vez. En cada ronda, el ganador suma un punto, el perdedor lo resta y los empates no alteran el marcador.

Supongamos que B adopta la estrategia —no muy inteligente— de sacar papel todas las veces. Tras ganar, perder y empatar algunas rondas, es probable que A se percate de esta táctica y adopte una contraestrategia ganadora, consistente en sacar siempre tijera. Llamemos a este perfil de estrategias [tijera, papel]. Si en cada ronda se produce este enfrentamiento, el jugador A ganará siempre.

Sin embargo, B no tarda en percatarse de lo disparatado de este perfil de estrategias y, viendo la confianza que deposita A en la tijera, pasa a sacar siempre piedra. Este perfil de estrategias, [tijera, piedra], hace que B comience a ganar. Pero, evidentemente, A cambiará entonces al papel. Durante estos tramos, ambos jugadores están empleando lo que se conoce como estrategias «puras»: una única estrategia que se selecciona y se emplea repetidamente.

Está claro que en este caso no se alcanzará ningún equilibrio: para cualquier estrategia pura (como sacar siempre piedra) se puede adoptar una contraestrategia (sacar siempre papel) que provocará un

nuevo cambio de tácticas. Los jugadores continuarán persiguiéndose eternamente el uno al otro alrededor de este círculo de estrategias.

Sin embargo, podemos también intentar usar una estrategia mixta. Supongamos que, en vez de escoger una única opción, en cada ronda podemos elegir aleatoriamente una de las estrategias puras. En lugar de sacar siempre piedra, una estrategia mixta podría consistir en sacar piedra la mitad de las veces y tijera la otra mitad. Nash demostró que, cuando se permite este tipo de combinaciones, todos los juegos de este estilo tienen al menos un punto de equilibrio. Tratemos de encontrarlo.

¿Qué estrategia mixta resultaría apropiada en el juego de piedra, papel o tijera? Una intuición razonable sería sacar piedra, papel o tijera con la misma probabilidad, táctica que denotaremos (1/3, 1/3, 1/3). Esto significa que elegimos piedra, papel o tijera con una probabilidad de 1/3. ¿Es ventajoso?

Supongamos que *B* opta por sacar siempre piedra: una estrategia pura que podemos representar como (1, 0, 0). ¿Cómo se desarrollará el juego con el perfil de estrategias (1/3, 1/3, 1/3) para *A* y (1, 0, 0) para *B*?

Para visualizar lo que ocurre, construyamos una tabla que muestre la probabilidad de cada uno de los 9 resultados que pueden producirse en cada ronda: *A* saca piedra y *B* saca piedra; *A* saca piedra y *B* saca papel; etcétera. En el cuadro que reproducimos aquí, la fila superior indica la elección del jugador *B*, y la columna de la izquierda, la de *A*:

A | B	Piedra	Papel	Tijera
Piedra	$\frac{1}{3}$	0	0
Papel	$\frac{1}{3}$	0	0
Tijera	$\frac{1}{3}$	0	0

Cada entrada indica la probabilidad de que se produzca el correspondiente par de elecciones en una ronda cualquiera, la cual no es más que el producto de las probabilidades asociadas a cada jugador. Por ejemplo, la probabilidad de que *A* elija papel es 1/3; al mismo tiempo, la de que *B* opte por piedra es 1. Por tanto, la probabilidad de que ocurran ambas viene dada por $1/3 \times 1 = 1/3$. Por otro lado, la probabilidad de que *A* saque papel y *B* tijera es $1/3 \times 0 = 0$, etcétera.

¿Cuánto se beneficia el jugador *A* de este perfil de estrategias? Ganará una tercera parte de las veces ([papel, piedra]), perderá otra tercera parte ([tijera, piedra]) y empatará en otro tercio de las ocasiones ([piedra, piedra]). Podemos calcular el número de puntos que obtendrá en promedio el jugador *A* en cada ronda sumando los productos de cada resultado por la probabilidad correspondiente:

$$\frac{1}{3}(1) + \frac{1}{3}(0) + \frac{1}{3}(-1) = 0\,.$$

Esto quiere decir que *A* obtendrá una media de 0 puntos por ronda: ganará, perderá y empatará con la misma probabilidad. En promedio, el número de victorias se compensará con el de derrotas y los jugadores estarán básicamente abocados a un empate.

Pero, como hemos avanzado, *A* puede obtener mejores resultados cambiando de estrategia, suponiendo que el oponente no cambie la suya. Si pasa a la estrategia (0, 1, 0), sacar siempre papel, la tabla de probabilidades quedará así:

A | B	Piedra	Papel	Tijera
Piedra	0	0	0
Papel	1	0	0
Tijera	0	0	0

Cada vez, el papel de *A* envolverá la piedra de su contrincante, de modo que ganará un punto por ronda.

Así pues, el par de estrategias (1/3, 1/3, 1/3) para *A* y (1, 0, 0) para *B* no constituye un equilibrio de Nash, ya que *A* puede obtener mejores resultados cambiando su estrategia.

En busca del equilibrio

Como hemos visto, las estrategias puras no parecen conducir al equilibrio. Pero ¿y si *B* prueba con una estrategia mixta, como (1/2, 1/4, 1/4)? Esta consiste en sacar piedra la mitad de las veces, y papel y tijera en una cuarta parte de las ocasiones, respectivamente. La tabla de probabilidades asociada es:

A | B	Piedra	Papel	Tijera
Piedra	$\frac{1}{6}$	$\frac{1}{12}$	$\frac{1}{12}$
Papel	$\frac{1}{6}$	$\frac{1}{12}$	$\frac{1}{12}$
Tijera	$\frac{1}{6}$	$\frac{1}{12}$	$\frac{1}{12}$

También tenemos la llamada «matriz de pagos», o de ganancias. Desde la perspectiva del jugador *A*, esta refleja el número de puntos que recibe al producirse cada uno de los resultados:

A | B	Piedra	Papel	Tijera
Piedra	0	–1	1
Papel	1	0	–1
Tijera	–1	1	0

Si multiplicamos las dos últimas tablas para calcular cuántos puntos obtendrá en promedio el jugador *A* en cada ronda, obtenemos:

$$\frac{1}{6}(0) + \frac{1}{12}(-1) + \frac{1}{12}(1) + \frac{1}{6}(1) + \frac{1}{12}(0) + \frac{1}{12}(-1) + \frac{1}{6}(-1) + \frac{1}{12}(1) + \frac{1}{12}(0) = 0\,.$$

A vuelve a ganar una media de 0 puntos por ronda. Como antes, el perfil de estrategias (1/3, 1/3, 1/3) para *A* y (1/2, 1/4, 1/4) para *B* termina en empate.

Pero, también como antes, *A* puede mejorar sus resultados cambiando de táctica: frente a la estrategia (1/2, 1/4, 1/4) de *B*, el jugador *A* podría emplear (1/4, 1/2, 1/4). Esto produce la siguiente tabla de probabilidades:

A | B	Piedra	Papel	Tijera
Piedra	$\frac{1}{8}$	$\frac{1}{16}$	$\frac{1}{16}$
Papel	$\frac{1}{4}$	$\frac{1}{8}$	$\frac{1}{8}$
Tijera	$\frac{1}{8}$	$\frac{1}{16}$	$\frac{1}{16}$

Como consecuencia, tenemos el siguiente resultado neto para *A*:

$$\frac{1}{8}(0) + \frac{1}{16}(-1) + \frac{1}{16}(1) + \frac{1}{4}(1) + \frac{1}{8}(0) + \frac{1}{8}(-1) + \frac{1}{8}(-1) + \frac{1}{16}(1) + \frac{1}{16}(0) = \frac{1}{16}\,.$$

Con este perfil de estrategias, (1/4, 1/2, 1/4) para *A* y (1/2, 1/4, 1/4) para *B*, el jugador *A* obtiene una media de 1/16 puntos por ronda. Después de jugar 100 veces, habrá sumado 6,25 puntos, por lo que *A* tiene un gran incentivo para cambiar de estrategia. Por tanto, el perfil de estrategias dado por (1/3, 1/3, 1/3) para *A* y (1/2, 1/4, 1/4) para *B* tampoco constituye un equilibrio de Nash.

Pero consideremos ahora el par de estrategias (1/3, 1/3, 1/3) para *A* y (1/3, 1/3, 1/3) para *B*. Esto implica la siguiente tabla de probabilidades:

A | B	Piedra	Papel	Tijera
Piedra	$\frac{1}{9}$	$\frac{1}{9}$	$\frac{1}{9}$
Papel	$\frac{1}{9}$	$\frac{1}{9}$	$\frac{1}{9}$
Tijera	$\frac{1}{9}$	$\frac{1}{9}$	$\frac{1}{9}$

Gracias a la simetría, resulta sencillo calcular el resultado neto:

$$\frac{1}{9}(0) + \frac{1}{9}(-1) + \frac{1}{9}(1) + \frac{1}{9}(1) + \frac{1}{9}(0) + \frac{1}{9}(-1) + \frac{1}{9}(-1) + \frac{1}{9}(1) + \frac{1}{9}(0) = 0\,.$$

Una vez más, el juego acabará en empate. Sin embargo, ahora la diferencia es que nadie tiene ningún aliciente para modifciar su estrategia. Si *B* cambiase a cualquier estrategia asimétrica, donde una de las opciones (piedra, por ejemplo) se usara más que las otras, *A* simplemente alteraría la suya para sacar papel más a menudo. Eso acabaría produciendo un resultado neto positivo en cada ronda para *A*, que es precisamente lo que ocurrió antes, cuando *A* adoptó la estrategia (1/4, 1/2, 1/4) en respuesta a la estrategia (1/2, 1/4, 1/4) de *B*.

Por supuesto, si *A* cambiase de (1/3, 1/3, 1/3) a una estrategia asimétrica, *B* podría sacar partido de un modo similar. Por tanto, ninguno de los dos jugadores puede mejorar sus resultados cambiando únicamente su propia estrategia: el juego ha alcanzado un equilibrio de Nash.

Equilibrios inalcanzables

Tal y como demostró Nash, el hecho de que para todos los juegos de este tipo exista un equilibrio es importante por distintos motivos. Uno de ellos es que hay muchas situaciones del mundo real que pueden modelizarse como si fueran juegos. Cada vez que varias personas se ven atrapadas en el tira y afloja que implica contraponer el beneficio personal y el colectivo, como ocurre durante una negociación o en la competencia por recursos compartidos, cada parte considerará distintas estrategias y evaluará los beneficios. La naturaleza ubicua de este modelo matemático explica la gran repercusión del trabajo de Nash.

Otra razón es que un equilibrio de Nash constituye, en cierto sentido, un resultado positivo para todos los jugadores. Cuando se alcanza, nadie puede mejorar cambiando su propia estrategia. Tal vez existan mejores resultados colectivos, los cuales podrían alcanzarse si todos los jugadores actuaran en perfecta cooperación. Pero, si lo único que podemos controlar es lo que hacemos nosotros, terminar en un equilibrio de Nash es lo mejor a lo que podemos aspirar.

Así pues, podríamos esperar que en «juegos» como los que aparecen en los paquetes de incentivos económicos, los sistemas tributarios, los tratados o los diseños de redes se acaben alcanzando equilibrios de Nash, donde todos los participantes, actuando sin más que en su propio interés, terminan contentos y donde los resultados son estables. Pero ¿es razonable suponer que los jugadores llegarán de manera natural a un equilibrio de Nash?

Resulta tentador pensar que sí. En nuestro ejemplo, podríamos haber adivinado que proceder de manera completamente aleatoria era lo mejor para ambos contrincantes. Pero eso ocurre, en parte, porque todos los participantes conocen las preferencias del resto: todos saben cuánto ganan y pierden los demás con cada resultado. Pero ¿y si las preferencias fueran secretas y más complejas?

Imaginemos un juego en el que *B* suma tres puntos cuando vence a la tijera y uno con cualquier otra victoria. Eso alteraría la estrategia mixta: *B* sacaría piedra más a menudo, con la esperanza de que *A* elija tijera y pueda así obtener la recompensa triple. Y, aunque la diferencia de puntos no afectaría directamente a las ganancias de *A*, el correspondiente cambio en la estrategia de *B* haría que *A* adoptase una nueva contraestrategia.

Por otro lado, si todas las ganancias del jugador *B* fueran diferentes y secretas, *A* tardaría un tiempo en descubrir la estrategia de su oponente. Pasarían muchas rondas antes de que *A* pudiera hacerse una idea de, por ejemplo, la frecuencia con que *B* elige piedra, a fin de calcular cada cuánto debería él sacar papel.

Ahora imaginemos que hay 100 personas, cada una con un conjunto diferente de ganancias secretas que dependen de a cuántos de sus 99 oponentes derrotan usando piedra, papel o tijera. ¿Cuánto tiempo tardaríamos en calcular la frecuencia con que deberíamos elegir cada opción para alcanzar un equilibrio? Probablemente mucho. Quizá más de lo que pueda durar el juego, o incluso más que el tiempo de vida del universo. Como poco, no resulta evidente que un juego así vaya a alcanzar un equilibrio, ni siquiera en el caso de jugadores perfectamente racionales, que emplean buenas estrategias y que actúan en su propio interés.

Esa es la idea central de un artículo publicado hace poco por Yakov Babichenko, del Instituto Technion de Israel, y Aviad Rubinstein, de la Universidad de California en Berkeley. Estos investigadores demostraron que no existe un método uniforme que conduzca a los jugadores a un equilibrio de Nash (ni siquiera aproximado) en todos los juegos. Eso no quiere decir que los jugadores perfectos nunca tiendan al equilibrio: a menudo lo hacen. Simplemente, significa que no hay ninguna razón para pensar que el equilibrio se alcanzará solo porque los jugadores sean perfectos.

Al diseñar una red de transporte, podríamos esperar que los «jugadores» (viajeros que buscan la manera más rápida de llegar a casa) alcancen de manera colectiva un equilibrio en el que no se gane nada al tomar una ruta diferente. Podríamos esperar que la mano invisible de John Nash los guiara para que sus intereses competitivos y cooperativos (tomar la ruta más corta posible, pero evitando al mismo tiempo crear atascos) los lleven al equilibrio.

Sin embargo, la versión compleja del juego de piedra, papel o tijera que acabamos de considerar demuestra por qué estas esperanzas podrían estar fuera de lugar. Puede que la mano invisible guíe algunos juegos, pero otros podrían evitar su control, dejando a los jugadores atrapados en una competición interminable en pos de unas ganancias que permanecerán para siempre fuera de su alcance. IyC

Este artículo apareció originalmente en QuantaMagazine.org, una publicación independiente promovida por la Fundación Simons para potenciar la comprensión pública de la ciencia



PARA SABER MÁS

Communication complexity of approximate Nash equilibria. Yakov Babichenko y Aviad Rubinstein en *Proceedings of the 49th Annual ACM SIGACT Symposium on Theory of Computing*, Montreal, junio de 2017. Disponible en **arxiv.org/abs/1608.06580**

EN NUESTRO ARCHIVO

Paradojas y atascos de tráfico. Juan M. R. Parrondo en *IyC*, septiembre de 2002.
El juego del ultimátum. Juan M. R. Parrondo en *IyC*, octubre de 2006.
El dilema del viajero. Kaushik Basu en *IyC*, agosto de 2007.



¡VIGILEN LOS CIELOS!
LA FILOSOFÍA DE LA CIENCIA FICCIÓN
Luis Miguel Ariza
Arpa Editores, 2018

¿Filosofía o ideología?

Un recorrido desaprovechado por la ciencia ficción más popular del último medio siglo

¡Vigilen los cielos!, título que homenajea al libro de Bill Warren *Keep watching the skies*, no es una obra sobre la filosofía de la ciencia ficción. Más bien puede definirse como un conjunto de ensayos sobre unas cuantas películas del género, en los que el autor, tras resumir la película con cierto detalle, ofrece su opinión sobre la ideología subyacente. El lector puede verse frustrado, bien porque no se trata de un libro sobre la filosofía de «la» ciencia ficción, bien porque solo toma en consideración películas *mainstream* (y no libros, cómics o películas menos populares), o también —y este es mi caso— porque el libro no trata en absoluto sobre filosofía.

Hay, por tanto, un serio desajuste entre lo que promete el título y lo que el libro ofrece, y es conveniente comenzar reseñándolo para que el lector quede avisado. Justificaré muy brevemente por qué sostengo que el libro no trata sobre filosofía, y después me centraré en comentar la obra en cuanto lo que es, sin incidir más en el desajuste entre título y contenido.

En filosofía desempeñan un papel muy importante los llamados «experimentos mentales». Por ejemplo, en cuestiones de identidad personal, uno puede pensar en escenarios hipotéticos en los que una persona entra en una máquina duplicadora de la que salen dos individuos idénticos que comparten memoria, carácter y aficiones. Para decidir qué sabemos y qué no, resulta interesante pensar si es coherente un escenario en el que un «genio maligno» está engañándonos sistemáticamente. Y para decidir si lo bueno se identifica con lo útil, es conveniente imaginar escenarios en los que se sacrifica la vida de un solo individuo inocente a cambio de una mejora en el bienestar de todos los demás.

Existen numerosas obras de ciencia ficción que desarrollan estos experimentos mentales dotándolos de un detalle que no se alcanza en los ensayos filosóficos y que resulta muy iluminador. Al desarrollar en una historia un escenario hipotético, descubrimos cosas que no esperábamos acerca de nociones que desde siempre han interesado a los filósofos: qué es una persona, qué es la realidad y el conocimiento, qué es bueno, en los ejemplos anteriores. Cuando digo que el libro de Luis Miguel Ariza no trata sobre filosofía, quiero decir que, cuando habla de *The Matrix*, por ejemplo, no menciona el mito de la caverna de Platón o el genio maligno de Descartes, ni hace comentario alguno sobre lo que nos muestra o nos hace pensar la película sobre la realidad, la identidad personal o, por poner otro caso, el estatuto ético de individuos inteligentes que no pertenecen a nuestra especie. Todo cuanto Ariza dice sobre *The Matrix* es que es una película conservadora; es decir, habla sobre la *ideología*, no sobre la filosofía de —o relacionada con— la película.

Dicho esto, tomemos el libro por lo que es: una colección de ensayos sobre varias películas que el autor encuentra interesante comentar desde un punto de vista ideológico. Visto así, el libro resulta fácil de leer. La mayor parte de las películas están bien contadas, especialmente algunas (por ejemplo, *Origen*, *2001* y *Gattaca*), aunque en otras ocasiones la exposición es algo escasa. Los ensayos incluyen algunos lances y otros comentarios sobre la verosimilitud de algunas escenas, las razones por las que la película tuvo éxito de público pero no de crítica, etcétera. Por lo general, el libro no entra en demasiadas profundidades. Todo es tratado con un tono muy ligero, y se desconoce la razón de ser del menú de películas que se le ofrecen al lector. (Dado que el interés del autor es hacer una crítica de la ideología subyacente a un conjunto de películas, no habría estado de más organizar la exposición en torno a ese eje e incluir una introducción general al tema de las ideologías que suelen reflejar las películas de ciencia ficción.)

Una vez concedido que se trata de un conjunto de ensayos de consumo fácil que no responden a lo que anuncia el título, el mayor problema que le veo al libro es la ligereza, no de escritura, sino de actitud, con la que el autor se enfrenta a la cuestión de la ideología de las películas. Cuando llega el momento de desvelar de qué pie ideológico cojea un determinado filme, Ariza recurre a simplificaciones de trazo grueso. Si en una película se puede entresacar un subtexto de desconfianza hacia la ciencia y el Estado, entonces la película es calificada de conservadora (aunque no siempre: *E.T.*, por algún motivo, constituye una excepción). Si, como en *La guerra de las galaxias*, además los «buenos» tienen poderes mágicos, entonces se nos dice que la película defiende el irracionalismo y que por tanto es extremadamente conservadora. En contraste, cuando los «buenos» son científicos, la película es *ipso facto* progresista.

Terminator es calificada de antifeminista y antiabortista porque la máquina enviada desde el futuro quiere matar a la madre del líder rebelde para que este no nazca. *X-Men* también cae en el lado del conservadurismo, aunque no tanto, por pintar al científico como un individuo peligroso (a propósito, sobran las calificaciones referidas al personaje). Aunque también se nos dice: «Trask [el científico] es un conservador nato, característica que añade una nota de conservadurismo al film» (pág. 178). El lector tal vez se quede pensando cómo puede ser conservadora una película en la que el «malo» es un «conservador nato». En principio, una película en la que un conservador hace el papel de antagonista será una película con un mensaje progresista. ¿Es suficiente con que el antagonista sea también científico para que el mensaje se convierta en conservador?

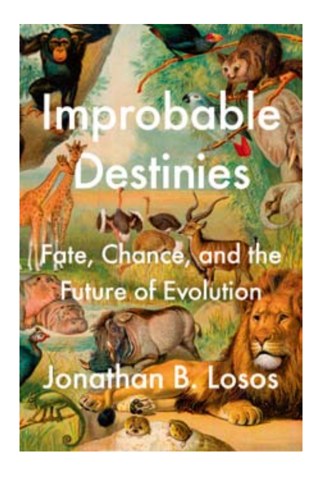
Los criterios que usa Ariza para etiquetar las películas como conservadoras o progresistas no son estables a lo largo del libro. Tampoco, por cierto, lo es su noción de ciencia, que normalmente, pero no siempre (véase el ensayo sobre *Independence Day*), incluye a la tecnología. Volviendo a

la dicotomía conservador-progresista, normalmente la desconfianza hacia el Estado es calificada de conservadora, pero no lo es siempre. El único criterio que se mantiene firme, salvo en *E.T.*, es el del papel que se le hace desempeñar a los científicos en la película. Pero ¿es esto razonable?

Ariza en ningún momento explica por qué elige los criterios que elige; supongo que le parecen obvios. A mí, sin embargo, me resulta todo menos obvio que una película en la que aparecen científicos entregados a las malas artes sea una película conservadora. Creo que Ariza establece una identificación poco matizada de la ciencia-tecnología actual con lo mejor del ideal de la Ilustración. No habría estado de más que hubiera dedicado algo de tiempo a justificar este y otros puntos de vista. También podría haber explicado por qué la ciencia ficción (frente a, por ejemplo, la fantasía) es ideológicamente interesante. Es lícito optar por escribir un libro ligero; pero, cuando se trata de criticar y expresar ideología, creo que resulta obligado ser algo más cuidadoso.

Como conclusión, no recomiendo el libro a quien esté interesado en filosofía ni a un conocedor de la ciencia ficción. La obra puede estar bien para quienes sientan curiosidad por saber algo del cine de ciencia ficción más popular del último medio siglo. Sin embargo, a ese lector le recomendaría que no hiciera caso de lo que afirma el autor sobre la ideología de las películas. No tanto porque tenga o deje de tener razón, sino porque no justifica sus calificaciones.

—Agustín Vicente
Fundación Ikerbaske
Universidad del País Vasco



IMPROBABLE DESTINIES
FATE, CHANCE, AND THE FUTURE OF EVOLUTION
Jonathan Losos
Riverhead Books, 2017

¿Es realmente impredecible la evolución?

De lo contingente y lo necesario en la historia de la vida

Sobre la evolución parecería que se ha dicho todo y que solo quedan los flecos; es decir, esos prodigios de adaptación con que los naturalistas de campo o los biólogos moleculares nos sorprenden a menudo. Nada más lejos de la verdad. Incluso capítulos enteros de la historia de la vida que se daban por conclusos pueden adquirir nueva luz y nuevas interpretaciones si se enfocan desde un prisma inteligente.

Hace 66 millones de años, en las postrimerías del Cretácico, un asteroide impactó contra la Tierra y propició la extinción de los dinosaurios y el éxito de los mamíferos. De haberse desviado ese asteroide, los dinosaurios habrían proseguido y el ser humano quizá no existiría. Tal es la tesis oficial. Contra esa visión, se ha propuesto un relato que sostiene que el declive de los dinosaurios había comenzado muchos millones de años antes del impacto, a medida que fue cambiando el clima, retrocedieron los mares, las temperaturas cayeron y los ambientes se desestabilizaron. Si hubiesen quedado dinosaurios, no habrían sobrevivido en un mundo más frío y selvático. El asteroide de Chicxulub y la actividad volcánica generalizada podrían haber resultado casi irrelevantes para su destino [*véase* «¿Qué causó la extinción de los dinosaurios?», por Stephen Brusatte; Investigación y Ciencia, febrero de 2016].

Jonathan Losos expone en *Improbable destinies* las cuestiones controvertidas y abiertas de un dominio que creíamos científicamente agotado. Losos, profesor de Harvard y encargado de la sección de herpetología de su Museo de Historia Natural, se ha especializado en los lagartos del género *Anolis*, los cuales han despertado la atención de los científicos por su exuberancia evolutiva. Se conocen unas 400 especies, número que aumenta cada año, convirtiendo así a *Anolis* en uno de los géneros más nutridos de los vertebrados. Tamaña diversidad se expresa en su gran riqueza local, combinada con endemismo; la mayoría de las especies se halla confinada en una isla o en una zona pequeña de tierra firme de la América tropical.

En los años sesenta, Stan Rand descubrió que diversas especies de *Anolis* coexisten al ocupar diferentes segmentos de un mismo hábitat: unos viven en la copa de los árboles, otros en el suelo y otros entre las ramas. Ernest Williams, por su parte, observó que el mismo conjunto de especialistas de hábitat se había adaptado en cada isla de las Antillas Mayores. Es decir, los lagartos habían evolucionado independientemente y habían ocupado los hábitats disponibles de forma casi idéntica en cada isla. Losos, a su vez, corroboró que, anatómica y ecológicamente, especies muy similares habían seguido el mismo curso evolutivo en islas distintas y de manera independiente. La biomecánica reveló la base adaptativa de la variación anatómica, dando cuenta de la adquisición de patas largas y grandes almohadillas digitales, entre otros rasgos, para especies que utilizaban determinadas zonas del hábitat.

Así las cosas, en 1989 apareció *Wonderful life: The Burgess Shale and the nature of history,* una de las principales obras de Stephen Jay Gould. El libro se centraba en ese yacimiento excepcional, una cantera de las Montañas Rocosas del Canadá. Contenía partes esqueléticas y blandas de una la singular y frágil fauna del Cámbrico, de hace entre 541 y 485 millones de años. Su tesis era sugerente: el curso de la evolución es peculiar e impredecible. Rebobinemos la película de la vida retrotrayéndola al comienzo y empecemos a filmar su desarrollo. Ahora, los fotogramas serán completamente distintos [*véase* «La evolución de la vida en la Tierra», por Stephen Jay Gould; Investigación y Ciencia, diciembre de 1994]. Simon Conway Morris no compartía esa idea. Sostenía que la evolución de organismos parecidos al ser humano sería algo cercano a lo inevitable en cualquier repetición de la película.

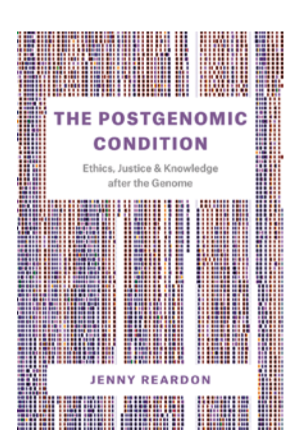
En biología no es posible retrasar las agujas del reloj e iniciar de nuevo la trayectoria de un linaje animal o vegetal. Para comprobar si se repiten o no los pasos y los resultados, hay que ensayar en distintos lugares. Puesto que las islas del Caribe han conservado en buena medida su entorno, ¿serían un buen lugar para someter a prueba la repetibilidad de la evolución? Para Losos, sí. Si Gould declaró que la evolución no volvía sobre sus pasos, el autor replica con el ejemplo de los lagartos y otras especies que sí lo han hecho. Se trata de la tesis alternativa: especies que viven en entornos similares adquirirán rasgos semejantes como adaptaciones a las presiones de selección compartidas que experimentan. La convergencia observada en esos reptiles demuestra que la evolución, lejos de ser singular e indeterminada, puede aventurarse. Hay formas limitadas de conformar un organismo en el mundo natural, por lo que la selección natural guía la evolución de los mismos rasgos una y otra vez.

Hemos avanzado mucho desde la aparición de *Wonderful life*. Han aparecido nuevas ideas y nuevos métodos de recogida de datos. Hemos descerrajado el genoma, cartografiado el árbol de la vida y conocido la evolución del microbioma. El registro fósil ha aportado luz sobre la historia de la evolución. Todos esos avances se conjugan para facilitar la predictibilidad de la evolución y el descubrimiento de la convergencia producida a lo largo del tiempo. Podemos ya estudiar la evolución tal y como se desarrolla delante de nuestros ojos. Y ello significa que podemos reeditar la película de la vida.

Los astrobiólogos piensan que la vida extraterrestre, si existe, debe basarse en el carbono y, por ende, será similar a la vida en nuestro planeta. La omnipresencia de la selección natural tiende a producir la misma solución para problemas comunes planteados por el entorno. Las leyes de la física son universales y dictan formas óptimas de adaptarse al medio, que no son exclusivas de nuestro mundo. El ADN, la clorofila o la hemoglobina podrían representar las mejores moléculas de un sistema basado en el carbono.

Devalúan la fuerza de ese determinismo numerosos contraejemplos de organismos cuyas adaptaciones nunca se duplicaron: el canguro, el ornitorrinco, la *Agave americana*, que solo florece una vez en sus diez años de vida, y el ser humano. Los primates poseen el equipo aparentemente necesario para desarrollar el vuelo: hábitats arbóreos, grandes cerebros, buena coordinación y metabolismo activo. Pero no parecen haber adquirido nunca el planeo, no digamos el vuelo propiamente dicho. Ninguna duplicación evolutiva es inevitable.

—Luis Alonso



THE POSTGENOMIC CONDITION
ETHICS, JUSTICE, AND KNOWLEDGE AFTER THE GENOME
Jenny Reardon
University of Chicago Press, 2017

La justicia en la genómica

Sobre la repercusión social de los grandes proyectos de secuenciación

En *The postgenomic condition*, Jenny Reardon pretende reconciliar los avances en el campo de la genómica con la justicia y la democracia. Volviendo la vista atrás, a dos décadas de avances genómicos, plantea preguntas espinosas sobre si los progresos como la medicina personalizada han tenido una repercusión realmente democratizadora. La autora recurre a los peores supuestos para demostrar la complejidad de la genómica humana y la bioética en el amplio contexto sociopolítico y mundial. Son relatos sobre ciencia escritos a modo de fábulas con moraleja, y perspectivas para prever, abordar y paliar los riesgos.

Reardon, socióloga en la Universidad de California en Santa Cruz, se sirve de más de una década de trabajo en empresas emergentes, laboratorios y organismos oficiales para elaborar un sólido y esclarecedor análisis sobre el Proyecto Genoma Humano y sus consecuencias. Trata su amplia repercusión social, desde la inclusión de las minorías en la investigación hasta la ampliación de los derechos y los deberes surgida de la compartición de muestras y datos humanos. Sostiene que la era posgenómica que se menciona en el título comenzó cuando la genómica se convirtió en foco de atención de «las esperanzas de justicia a través de los datos y la democracia que trajo consigo el cambio de milenio». Con el nacimiento de una genómica que fue «participativa, inclusiva y abierta», los datos de secuenciación adquirieron significado y valor.

Su narración comienza a inicios de los años noventa. Al Proyecto Genoma Humano le siguieron otras iniciativas, como el Human Genome Diversity Project, el International Hap-Map Project, la empresa islandesa deCODE genetics y el Generation Scotland, un biobanco nacional de tejidos donados. Reardon hace una crónica del auge adquirido en la primera década del siglo por los proyectos de genómica personalizada y las empresas dedicadas a ella, como 23andMe, el Personal Genome Project, la iniciativa para compartir datos médicos Open Humans y el mundo de la biología ciudadana, como la comunidad DIYbio.org. Así, traza la transición de la investigación genómica hacia una empresa más participativa y diversa que acabó transformando las concepciones de autogestión y privacidad. Los modelos genéricos de consentimiento, por ejemplo, han modificado el carácter del consentimiento en sí, que ha pasado de ser «lo que las personas permiten que los investigadores hagan con sus datos a lo que ellas mismas hacen con ellos».

Reardon presenta una visión atrevida de las posibilidades de la genómica. Indaga en el valor del genoma humano desde una perspectiva utilitarista, afirmando que el ADN humano y sus datos constituyen el recurso bruto de nuestra época: una materia prima cuyo valor debe ser cuantificado como biocapital. Así pues, la era posgenómica entraña el uso de la información y

del conocimiento como la divisa con la que construir una genómica que sea «de la ciudadanía y para la ciudadanía».

Argumenta, empero, que hasta la fecha la realidad no concuerda con ese propósito. Asegura que no quiere calificar a las partes de héroes o villanos, pero lo hace, si bien con destreza y notable matización. Sugiere que una sociedad libre que obtenga rédito económico del ADN de sus ciudadanos conduce a la «corrupción colectiva de la ciencia». A su juicio, la genómica es una disciplina en la que el propósito de desentrañar las enfermedades humanas rivaliza con el de resolver «las disputas en torno a la propiedad, las identidades y los recursos». Reardon destaca las tensiones entre la inclusión y la exclusión, la transparencia y la oscuridad, la libertad y el control, y, por último, la integridad y el interés público [*véase* «¿Debe secuenciarse el genoma de los recién nacidos?», por Bonnie Rochman; Investigación y Ciencia, mayo de 2017].

Critica sin ambages la US Precision Medicine Initiative, un estudio de gran entidad y a largo plazo dirigido por los Institutos Nacionales de Salud de EE.UU., que persigue diseñar estrategias de prevención y tratamiento que tengan en cuenta la variabilidad individual de los genes, el entorno y los hábitos. Lo considera una estratagema de relaciones públicas con la que se quiere manejar a los participantes en la investigación y ofrecerles lo que pueden parecer ideas innovadoras con el fin de «inducirlos a aceptar». Ahonda, además, en casos complejos, como el de Henrietta Lacks, cuyo tumor uterino sirvió para crear la estirpe celular HeLa sin contar con su consentimiento.

El libro concluye con una vaga propuesta de creación de una comisión nacional que reexamine el Informe Belmont de 1979, el informe federal de EE.UU. sobre los principios éticos que deberían regir la investigación con seres humanos. A pesar del atractivo enfoque personal que imprime a su narración, la autora solo aborda puntualmente los factores socioculturales e históricos que condicionan las iniciativas en el campo de la genómica, y deja fuera en gran parte el análisis de los marcos políticos nacionales que los regulan. Su frecuente alusión a la teoría política, sobre todo a los trabajos de Hannah Arendt, pueden hacer la obra inaccesible a un público amplio.

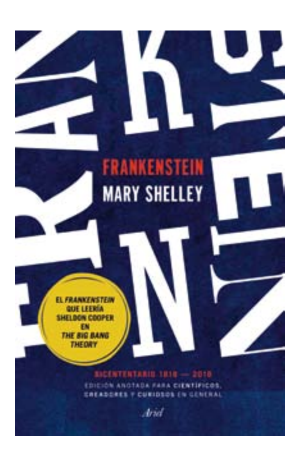
El mensaje latente de Reardon transmite desengaño. Cree en el enorme potencial de la genómica, pero equipara el genoma humano con una divisa hasta ahora privada de valor por la falta de grandes avances médicos derivados. Y aquí radica la gran flaqueza del libro. Como narradora, olvida los relatos en que los descubrimientos ya han generado valor y poder transformador.

No hay en el libro ni una palabra para los programas de cribado de recién nacidos que han culminado con éxito, o para las incipientes terapias génicas contra el cáncer y otras afecciones, como la atrofia muscular espinal o la distrofia muscular de Duchenne, la drepanocitosis o la leucemia. Ni una palabra para las iniciativas que ya han tenido un inmenso impacto en el diagnóstico o el tratamiento de enfermedades minoritarias o intratables, como las tesaurismosis lisosómicas o el síndrome de miastenia congénita. También se echa en falta la voz de las personas afectadas por trastornos genéticos y la de aquellas que trabajan a caballo de la atención médica y la investigación, donde la importancia del genoma humano está siempre presente. En mi opinión, si hubiéramos escuchado a esos actores, la respuesta a la pregunta fundamental de Reardon (¿qué valor tiene el genoma humano?) habría sido contundente e inequívoca. El genoma humano tiene un valor inefable.

—Rosario Isasi
Departamento de Genética Humana
Universidad de Miami, Florida

Artículo original publicado en *Nature*, vol. 551, págs. 296-297, 16 de noviembre de 2017.
Traducido con el permiso de Macmillan Publishers Ltd. © 2018

Con la colaboración de nature



FRANKENSTEIN
EDICIÓN ANOTADA PARA CIENTÍFICOS, CREADORES Y CURIOSOS EN GENERAL

Mary Shelley
Dirigido por David H. Guston, Ed Finn y Jason Scott Robert
Ariel, 2017

Frankenstein anotado

Un clásico de la literatura universal a la luz de la ciencia moderna

En la novela *Frankenstein, or the modern Prometheus*, escrita en 1818 por Mary Wollstonecraft Shelley (1797-1851) y de la que este año celebramos el bicentenario, el protagonista, Víctor Frankenstein, al que nunca se le llamará «doctor» en la ficción, crea un monstruo sin nombre y sufre las terribles consecuencias de su atrevimiento cuando el humanoide mata a su hermano William, a su esposa Elizabeth y a su mejor amigo, Henry Clerval. Destinada la obra en un comienzo a gente de letras, la edición que ahora se presenta tiene en su punto de mira a estudiosos de ciencias, carreras técnicas y matemáticas. La acción de la novela se desarrolla en los años finales del siglo xviii, en los albores de la Revolución Industrial.

Siendo una adolescente, Mary abandonó Inglaterra en dirección al continente europeo acompañando a su amante, el poeta Percy Bysshe Shelley. En el verano de 1816, Lord Byron los invitó a la mansión que había alquilado a orillas del lago de Ginebra. Aquel fue el año sin verano, una anomalía climática causada por la erupción del monte Tambora, en Indonesia. Una lluvia pertinaz y unos cielos grises mantenían encerrados a los huéspedes. Para distraerlos, Lord Byron sugirió un juego: cada uno debía escribir una historia de terror. Así nació *Frankenstein*. Para entonces, Shelley había perdido a su hija Clara, que nació en 1815 y murió con dos semanas. Confesaría que el sueño despierto que la movió a escribir la novela fue su deseo de reanimar a Clara, de devolverla a la vida.

Víctor Frankenstein, el científico protagonista, vivió una idílica infancia en

NOVEDADES

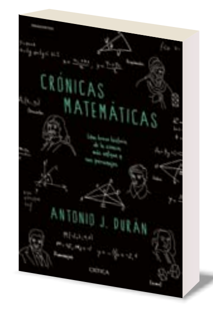
Una selección de los editores de **INVESTIGACIÓN Y CIENCIA**



EL REINO IGNORADO
UNA SORPRENDENTE VISIÓN DEL MARAVILLOSO MUNDO DE LAS PLANTAS
David González Jara
Ariel, 2018
ISBN: 978-84-344-2783-9
272 págs. (19,90 €)



HISTORIA DE LAS MOSCAS Y DE LOS MOSQUITOS
Y SU INFLUENCIA EN EL DEVENIR DE LA HUMANIDAD
Xavier Sistach
Arpa Editores, 2018
ISBN: 978-84-16601-76-9
400 págs. (19,90 €)



CRÓNICAS MATEMÁTICAS
UNA BREVE HISTORIA DE LA CIENCIA MÁS ANTIGUA Y SUS PERSONAJES
Antonio J. Durán
Crítica, 2018
ISBN: 978-84-17067-75-5
480 págs. (19,90 €)

una Ginebra paradisíaca. Estudió medicina y técnicas avanzadas en la Universidad de Ingoldstadt, de la que salió en 1789, año de la toma de la Bastilla. Pergeñó su criatura monstruosa en 1793. Nada de extraño, en esa atmósfera revolucionaria, que *Frankenstein* nos presente un mundo de oscuridad, sombras y miedo.

Shelley deja sin nombre al monstruo; sin apelativo, queda patente que no posee una identidad clara ni hay forma idónea de definirle una. El drama de Frankenstein y su engendro se ha convertido ya en parábola universal que compendia nuestros miedos ancestrales sobre las promesas, peligros y fracasos de incontables áreas de la ciencia y la técnica. Desde el tiempo de Shelley, la ciencia y la técnica han ido calando profundamente en la sociedad. Nos encontramos hoy ante la fabricación de seres vivos por biología sintética, el diseño de sistemas a escala planetaria mediante ingeniería del clima, y la integración de la potencia computacional en todos los sectores de la sociedad y en las mismas fibras de nuestro ser.

Víctor procede de una familia de la alta nobleza. Aplica su preparación científica para crear una nueva vida. Le guían la búsqueda de la gloria y el reconocimiento público a través de la filosofía natural de su tiempo. Se propone crear la inmortalidad, pero luego abdica de la responsabilidad consiguiente. El aviso sobre los peligros de tales pretensiones lo encontramos en numerosos antecedentes de la Grecia clásica. En el mito clásico, Prometeo moldea la arcilla en la que Atenea, diosa de la sabiduría, infunde vida, creando la especie humana. Prometeo dota a los humanos del fuego.

Shelley habla de la «chispa» que anima al monstruo y le confiere el aliento de vida. El término refleja la importancia adquirida por la electricidad y su aplicación para reanimar el cuerpo, una idea relativamente nueva en aquellas fechas. Hacia finales del siglo xviii, Luigi Galvani había demostrado que la aplicación de una corriente eléctrica podía activar el músculo de una rana. Shelley se inspiró en los experimentos del profesor de la Universidad de Bolonia. Hoy, la estimulación eléctrica se aplica a millones de personas en múltiples medios, desde los desfibriladores hasta los tratamientos parciales de parálisis y los marcapasos.

El lenguaje religioso que envuelve la ambición de Víctor Frankenstein se inscribe en una larga tradición del hombre que juega a ser Dios. Aunque la *hybris* es un tema recurrente en psicología y en filosofía, la tentación de igualar a los dioses parece solo aumentar con el poder creciente de la ciencia y la técnica.

Frankenstein sufre las dolorosas consecuencias de su atrevimiento. A modo de transacción, el monstruo le propone un plan: que le cree una mujer y cesará en su macabra trayectoria. Víctor comienza a trabajar en la compañera, pero a medio camino se percata de que ello podría dar lugar a una progenie que acabase con la estirpe humana, por lo que destruye su proyecto.

Una pauta similar la advertimos en muchos relatos sobre los riesgos de la técnica, como en *R.U.R.*, de Karel Čapek (1920), una obra donde los robots confunden las expectativas de sus creadores y se convierten en rebeldes. Este fenómeno se hace hoy evidente en dos campos: la biología sintética y la inteligencia artificial. Objetivo central de la agenda de la biología sintética es el deseo de crear nuevas especies, alzarse con el control genético de los organismos que nos puedan beneficiar con nuevos alimentos, fármacos y combustibles. El peligro es que el comportamiento de esos organismos se torne imprevisible y se vuelvan contra nosotros, como los robots de Čapek.

Shelley ofreció pocos detalles sobre las piezas que iba conjuntando y la chispa de vida que infundió en aquella yuxtaposición inerte. Hoy podríamos reconstruir una persona, en parte al menos, con elementos prestados y aprovechando las técnicas disponibles, como trasplantes de riñón, hígado, corazón, pulmones o intestino. Podrían trasplantarse también tejidos de la piel, nervios e incluso un rostro. En 2014 se consiguió con éxito el primer trasplante de pene, y ese mismo año nació en Suecia un niño en un útero trasplantado. Además, se están desarrollando tejidos a partir de células extraídas del propio paciente. A ello cabe sumar las posibilidades que ofrecen los exosqueletos biónicos con control remoto de extremidades artificiales y prótesis, así como los implantes cocleares y órganos mecánicos, corazón incluido, siquiera sean de uso temporal. Y lo que realmente mueve a pensar en Frankenstein: las técnicas de edición génica, capaces de crear un ser humano y manipular el genoma para librarlo de enfermedades y potenciar determinadas capacidades, como la fuerza, la agilidad o la inteligencia.

—Luis Alonso

Recopilación de Daniel C. Schlenoff

SEPTIEMBRE

1968

Láseres avanzados

«Existen ya centenares de máseres y láseres generadores de frecuencias que cubren casi todo el espectro electromagnético, desde la zona de las radiofrecuencias hasta el ultravioleta. Parece, desde luego, que no tardará mucho en ampliarse hasta la región de los rayos X la técnica de estimular emisiones. Mientras tanto, el desarrollo de los láseres de luz visible ya despierta gran entusiasmo. Conforme logramos potencias cada vez mayores, la luz láser va mostrando unos fenómenos no lineales extraordinarios al interactuar con la materia. Algunos de los láseres ahora en desarrollo en el laboratorio, como las versiones sintonizables y de picosegundos, nos ponen de manifiesto que los láseres han sido hasta hoy unos dispositivos más bien simples. —Arthur Schawlow»

Schawlow compartió el premio Nobel de física en 1981 por su trabajo sobre la luz láser.

1918

Enfrentarse al mar

«Tras considerarlo durante casi 70 años, la población de los Países Bajos está a punto de iniciar el avenamiento de parte del Zuidersee al objeto de añadir 2100 kilómetros cuadrados a la actual superficie de tierra firme de Holanda. La presión de la guerra y la tarea de albergar a centenares de miles de refugiados han hecho que Holanda cobre consciencia de su escasez de terreno agrícola. Se necesitará un enorme dique de por lo menos 30 kilómetros de largo para confinar el Zuidersee, que a la vez sea lo bastante resistente ante los embates del mar del Norte en sus momentos más violentos. La máxima altura que se sepa que hayan alcanzado las olas en la costa del Zuidersee se dio en diciembre de 1883, cuando, a causa de un vendaval excepcionalmente intenso, estas ascendieron más de cinco metros por encima del nivel de una marea alta normal. La altura del dique sobre el nivel del mar en su extremo cercano al norte del país será de 5,4 metros.»



1968



1918



1868

La guerra en el aire

«Velocidad, destreza en la ascensión y puntería son solo tres factores del combate aéreo. No es arriesgado afirmar que la habilidad en la maniobra es con mucho el más importante. El aviador que sepa todos los trucos de su oficio cuenta con las máximas probabilidades de vencer o escapar. Una pirueta muy usada en el frente es el picado ascendente seguido de un resbalamiento de cola. Cuando un aparato está siendo perseguido por otro que le dispara sin cesar, la maniobra habitual del primer piloto es tirar hacia atrás de la palanca de mando, enfilando la máquina hacia arriba hasta ponerla en vertical. Entonces, por un instante, la máquina "cuelga" de la hélice, para luego retroceder y recuperar finalmente la posición horizontal. Se situará así detrás de su oponente y la ventaja será suya.»



1918: El combate aéreo fue una novedad que se desarrolló en la Primera Guerra Mundial. Aquí dos aviones se enfrentan en los cielos.

SCIENTIFIC AMERICAN, VOL. CXIX, N.º 10, 7 DE SEPTIEMBRE DE 1918

1868

Víctimas de la moda

«Las revistas médicas están llevando a cabo una poco convincente cruzada contra las botas de tacón alto y puntera estrecha hoy en boga. Esta moda debe de estar generando una rica cosecha para los callistas y es seguro que producirá unos mayores o menores grados de deformidad permanente. Cuando se eleva el talón, la pelvis y los huesos de la pierna, así como los de los pies, se fuerzan a una posición anómala; el efecto de tan antinatural tensión puede dar lugar a espinillas torcidas, piernas arqueadas, articulaciones de los dedos de los pies elefantinas y un andar de paso corto y torpe. Esperemos que, antes de que esos males se hayan multiplicado aún más, la veleidosa moda haya abandonado su causa y nos ofrezca algo más sensato y duradero que esos mortificadores de pies.»

Obsesión victoriana

«La idea de ser enterrado vivo llena de horror las mentes, y los relatos publicados a veces con la descripción de tales hechos han atraído siempre la atención de un público amante de las sensaciones fuertes. Hay numerosas, y en general, fiables pruebas para determinar si ha ocurrido la muerte antes del comienzo de la descomposición, pruebas que conoce la mayoría de la gente. Admitiendo que en casos sumamente raros sea posible que estas fallen, cuesta entender de qué modo el ataúd patentado del señor Vester sea una mejora. Consiste en un ataúd ordinario con un tubo en la cabecera, que contiene una escalera y una cuerda que permitirían a la persona resucitada acceder al aire libre, siempre que su vigor se lo permita, algo que consideramos dudoso en la mayoría de los casos. Se proclama que la invención resulta inestimable para personas enterradas en estado de trance.»

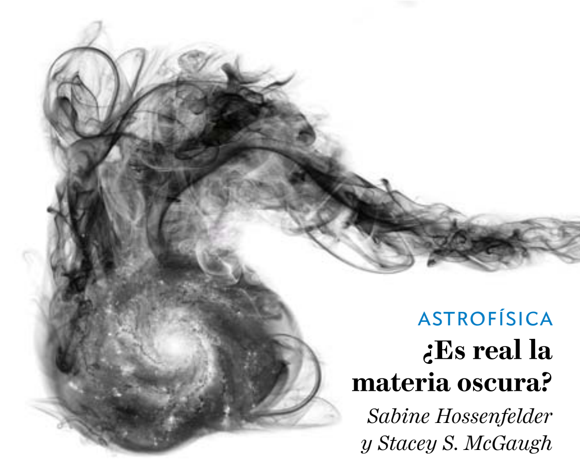


NEUROCIENCIA

El estrecho nexo entre la inmunidad y el cerebro

Jonathan Kipnis

El sistema inmunitario, que se creía separado del nervioso, influye profundamente en su funcionamiento.



ASTROFÍSICA

¿Es real la materia oscura?

Sabine Hossenfelder y Stacey S. McGaugh

Los astrofísicos han recopilado observaciones que son difíciles de explicar con la materia oscura. ¿Hay en la gravedad algo más de lo que Einstein nos enseñó?

EVOLUCIÓN HUMANA

Neandertales y humanos en la península ibérica: encuentros y desencuentros

Manuel Vaquero

Los cambios biológicos y culturales que se produjeron en Europa hace unos 40.000 años, con la llegada de los humanos modernos y la extinción de los neandertales, son objeto de un intenso debate en el que la península ibérica desempeña un papel fundamental.



ECOLOGÍA

Funciones ecológicas de los termiteros

Lisa Margonelli

Las interacciones entre las termitas y la vegetación originan misteriosas formaciones de nidos en todo el mundo.

INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

DIRECTORA GENERAL
Pilar Bronchal Garfella
DIRECTORA EDITORIAL
Laia Torres Casas
EDICIONES Anna Ferran Cabeza, Ernesto Lozano Tellechea, Yvonne Buchholz, Bruna Espar Gasset
PRODUCCIÓN M.ª Cruz Iglesias Capón, Albert Marín Garau
ADMINISTRACIÓN Victoria Andrés Laiglesia
SUSCRIPCIONES Concepción Orenes Delgado, Olga Blanco Romero

EDITA

Prensa Científica, S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Teléfono 934 143 344 Fax 934 145 413
e-mail precisa@investigacionyciencia.es
www.investigacionyciencia.es

SCIENTIFIC AMERICAN

EDITOR IN CHIEF AND SENIOR VICE PRESIDENT
Mariette DiChristina
PRESIDENT Dean Sanderson
EXECUTIVE VICE PRESIDENT Michael Florek



DISTRIBUCIÓN

para España:
LOGISTA, S. A.
Pol. Ind. Polvoranca - Trigo, 39 - Edificio B
28914 Leganés (Madrid)
Tel. 916 657 158

para los restantes países:
Prensa Científica, S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona

PUBLICIDAD

Prensa Científica, S. A.
Tel. 934 143 344
publicidad@investigacionyciencia.es

SUSCRIPCIONES

Prensa Científica, S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Tel. 934 143 344 - Fax 934 145 413
www.investigacionyciencia.es

Precios de suscripción:

	España	Extranjero
Un año	75,00 €	110,00 €
Dos años	140,00 €	210,00 €

Ejemplares sueltos: 6,90 euros

El precio de los ejemplares atrasados es el mismo que el de los actuales.

COLABORADORES DE ESTE NÚMERO

Asesoramiento y traducción:

Javier Grande: *Apuntes*, *Un nuevo método de validación estelar*, *Cruzar la frontera cuántica* y *Por qué ganar en piedra, papel o tijera no lo es todo*; Andrés Martínez: *Apuntes*, *Comercio de mascotas exóticas*, *La justicia en la genómica* y *Biopelículas mortíferas*; Fabio Teixidó: *Los ciclones tropicales se ralentizan* y *La próxima gran explosión*; Carlos Lorenzo: *La auténtica paleodieta*; Elisa Vilaret: *La lucha contra los mosquitos*; Marián Beltrán: *Nuestras cosas, nosotros mismos*; Ramón Muñoz Tapia: *Superimanes permanentes*; J. Vilardell: *Hace...*

ISSN edición impresa 0210-136X Dep. legal: B-38.999-76
ISSN edición electrónica 2385-5665

Imprime Rotocayfo (Impresia Ibérica) Ctra. de Caldes, km 3
08130 Santa Perpètua de Mogoda (Barcelona)

Printed in Spain - Impreso en España